

高炉水砕スラグ

「土工用材料としての技術資料」

平成 21 年 1 月

鐵 鋼 ス ラ グ 協 会

監修者のことば

高炉水砕スラグは、鉄鉱石から銑鉄を製造する際に生成され、ほぼ 100%有効活用されている。その中で、高炉水砕スラグを土工用材料として適用しようとする試みは古くから行われており、多くの施工実績・結果を踏まえて、高炉水砕スラグの特性を設計に反映すべく、1983 年に水砕スラグ「土工用材料としての技術資料」が発刊された。その後、地盤工学を取り巻く状況は大きく変化し、さらに多くの施工、研究開発が行われ、新たな知見が得られていることから、同技術資料も改訂されることとなった。

私が高炉水砕スラグの地盤用材料としての利点に注目したのは、実際の材料に触れたとき、自然砂ときわめて類似している点に驚き、さらに自硬性があることに驚いたことが契機となった。また、当時は瀬戸内海での海砂の採取規制に伴い、代替材の大量確保が必要とされていた時期ではあるが、自硬性を活用した新たな地盤材料として注目されないままになっていることが不思議なくらいであった。しかし、実際に現場で用いようとしたとき、その特性を十分に発揮した設計を行う上では、未解明な点も多々あることが分かった。当時は、鐵鋼スラグ協会としても、新たな土木分野での利用を模索している段階でもあって、私も研究室をあげて、高炉水砕スラグの研究に集中することとした。特に、高炉水砕スラグは、それ自体が普通肥料として用いられている等、健康に対しても安全であるという点も研究を後押しした。また、我が国の高炉は瀬戸内海に集中しており、近隣の各県に高炉が設置されていることから、多くのご協力を頂くことができる状況にあり、恵まれた環境で研究を継続することができた。

本技術資料は初刊から長年月が経過しての改訂である。本技術資料を初刊と比較したとき、高炉水砕スラグが有する地盤工学的に優れた多くの新たな知見が組み込まれ、設計に反映できるようにマニュアル化されている。

今後、この技術資料によって、高炉水砕スラグの適用分野が広がり、自然砂の代替材としての利用はもちろんのこと、自然砂と比べても安全でかつ経済性に優れた構造物の設計・施工に繋がることを期待する。

山口大学大学院

工学博士 松田 博

高炉水砕スラグ
「土工用材料としての技術資料」
目次

1. 適用範囲	1
2. 水砕スラグの概要	1
3. 水砕スラグの基本的性質	3
3.1 物理的性質, 透水, 締固め, 沈下特性	3
3.1.1 土粒子密度および間隙比	3
3.1.2 単位体積重量	5
3.1.3 粒度	8
3.1.4 透水性	9
3.1.5 締固め特性	11
3.1.6 CBR 特性	13
3.1.7 沈下特性	14
3.2 化学的性質	15
3.2.1 化学成分	15
3.2.2 溶出	15
3.3 水砕スラグの固結特性	18
3.4 力学的性質	20
3.4.1 固結していない水砕スラグのせん断強度特性	20
3.4.2 固結した水砕スラグのせん断強度特性	23
3.4.3 動的変形特性	25
3.4.4 液状化特性	26
4. 使用上の留意点	27
4.1 設計・施工時の留意点	27
4.1.1 撒き出し	27
4.1.2 水管理	29
4.1.3 締固めによる密度の変化	30
4.1.4 法面	32
4.1.5 砂杭として用いる場合	33
4.1.6 各種用途に対する適用性	34
4.1.7 水砕スラグの固結	34
4.2 環境に関する留意点	35
4.3 植物への影響	36
4.4 鋼材の腐食	38

4.5	凍上	40
5.	設計例	41
5.1	裏込め	41
5.2	路床	47
5.3	置換	49
5.4	盛土	52
5.4.1	限界盛土高	52
5.4.2	沈下量	53
5.5	サンドコンパクションパイル	55
6.	水砕スラグ使用事例	58
6.1	水砕スラグ単体で使用した事例	58
6.1.1	路床	58
6.1.2	サンドコンパクションパイル (その1)	59
6.1.3	サンドコンパクションパイル (その2)	60
6.1.4	半地下道路構造物裏埋め材	61
6.1.5	擁壁裏込め材	62
6.1.6	テールアルメ工法	63
6.2	固結促進工を併用して使用した事例	64
6.2.1	強化路床工法	64
6.2.2	強化コンパクションパイル工法	65
6.2.3	軽舗装工法	66
6.2.4	法面防護工法	67
6.2.5	充填材	68
6.2.6	表層安定処理工法	69
	付録	72

1. 適用範囲

本技術資料は、高炉水砕スラグ（以下、水砕スラグと記す）を土工用材料として使用する場合に適用する。

【解説】

水砕スラグは、セメント用、コンクリート用、肥料用等に広く使用されている。本技術資料は、それらの用途のうち、水砕スラグを土工用材料として使用する場合の設計・施工法を示したものである。なお、護岸・岸壁の裏込めや埋立てなどの港湾工事に使用する場合には、(財)沿岸技術研究センターから刊行されている「港湾・空港における水砕スラグ利用マニュアル 平成19年」¹⁾（以下、「利用マニュアル」と記す）を参照されたい。

水砕スラグは、土工用材料として以下に示すような有利な性質を有しており、これらの性質を利用することにより、経済的な設計を行うことができる。水砕スラグは工業製品であるため、同じ工場で製造された水砕スラグの性質の変動は小さいが、工場間での材料の性質に多少の差異がみられることがある。したがって、重要な構造物に利用する場合には、事前に試験等を行って必要な数値を確認して利用することが望ましい。

○物理的性質・化学的性質

- (1) 工場で製造されるため、粒度や密度などの性質が安定している
- (2) 粒子内に気泡を有し、形状が角張っているため、単位体積重量が小さい
- (3) 水硬性を有する

○力学的性質

- (1) 粒子が角張っているため、せん断抵抗角が大きい
- (2) 細粒分が少なく間隙比が大きいため、透水性に優れている
- (3) 締固めの際、含水比による影響が小さい

2. 水砕スラグの概要

本技術資料で対象とする水砕スラグとは、製鉄所の高炉において生成した熔融状態のスラグを急冷処理して製造した高炉水砕スラグのことである。

【解説】

製鉄所で鉄鋼を製造する過程において、1億トンの粗鋼生産に対して約3,600万トンの鉄鋼スラグが生成する。鉄鋼スラグには、製鉄工程で生成する高炉スラグと、製鋼工程で生成する製鋼スラグとがあるが、全体の60～70%が高炉スラグである。高炉スラグは、約1,500℃の熔融状態から徐冷処理した高炉徐冷スラグと、吹製装置で加圧水（80～350kPa（kN/m²））による急冷処理した高炉水砕スラグとに分類される。本技術資料は、これらのうち後者の高炉水砕スラグ（水砕スラグ）を対象としている。

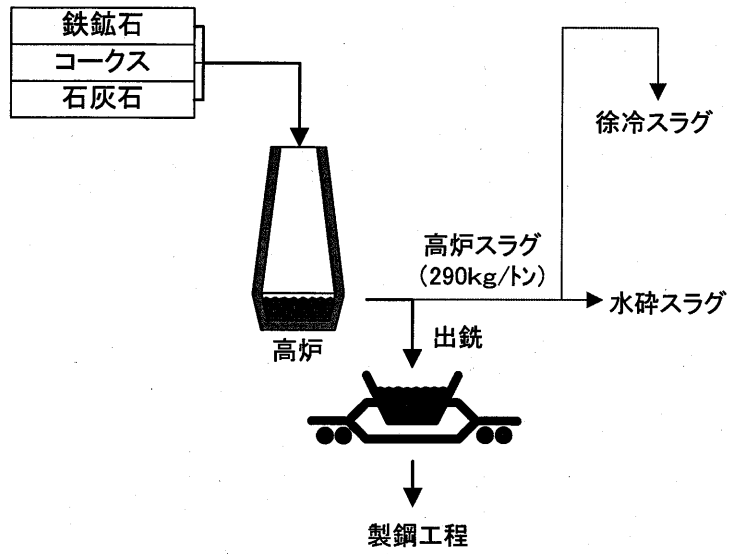


図 2.1.1 高炉スラグの製造過程

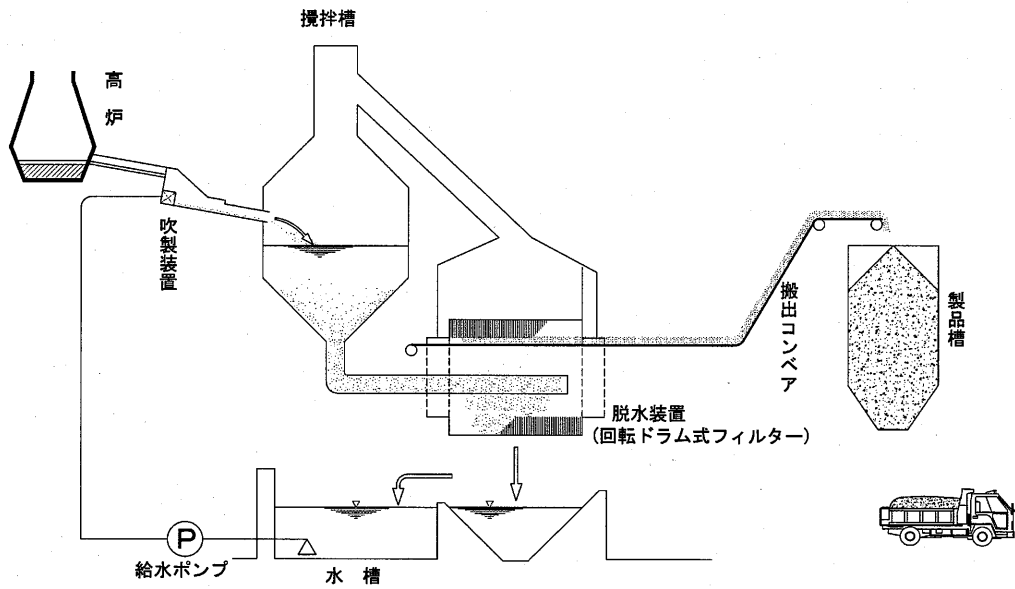


図 2.1.2 水砕スラグの製造過程例

3. 水砕スラグの基本的性質

3.1. 物理的性質，透水，締固め，沈下特性

3.1.1. 土粒子密度および間隙比

水砕スラグの土粒子密度は、概ね $2.6\text{g/cm}^3 \sim 2.9\text{g/cm}^3$ である。また、間隙比は天然砂よりも大きい。

【解説】

図 3.1.1 は、2005 年に全国の 13 製鉄所から生成した水砕スラグについて、JIS A 1202「土粒子の密度試験方法」によって土粒子密度を測定した結果である。その最小値は 2.60g/cm^3 、最大値は 2.86g/cm^3 、平均値は 2.74g/cm^3 であり、天然砂の値とほぼ等しい。「港湾工用水砕スラグ利用手引書 平成元年 8 月」²⁾ (以下、「元年度版利用手引書」と記す) では、土粒子密度の平均値として 2.695g/cm^3 が示されており、これと比較すると、約 20 年間で平均値が 0.05g/cm^3 増加している。これは、製鉄所の製造条件 (熔融スラグ温度、水温および水圧等) の変化に起因しているものと考えられる。また、水砕スラグの土粒子密度は主に製造条件に起因しているため、同じ製鉄所内から生成する水砕スラグでの変動は小さい。ちなみに、粒子内部に気泡をほとんど含まないと考えられる高炉スラグ微粉末の密度は 2.9g/cm^3 前後である³⁾。

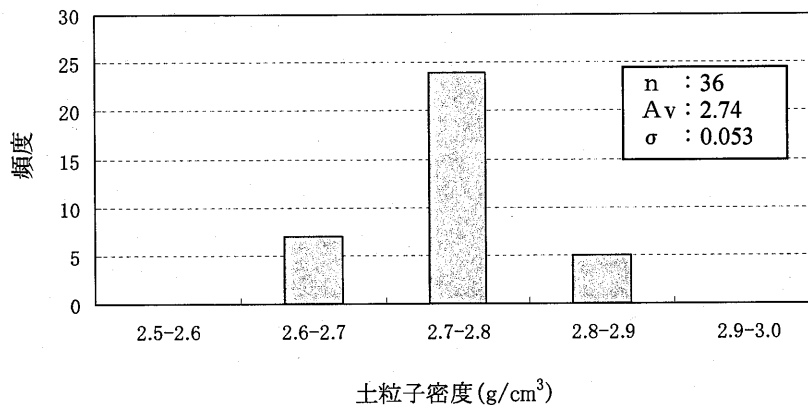


図 3.1.1 水砕スラグの土粒子密度のヒストグラム

図 3.1.2, 図 3.1.3 および表 3.1.1 は、全国の 12 製鉄所で製造された水砕スラグについて JIS A 1224「砂の最小密度・最大密度試験」によって求めた最大・最小間隙比および最大・最小密度である。表には、参考として玄海砂の最大・最小間隙比および最大・最小密度の測定例⁴⁾を含めている。水砕スラグの平均最大間隙比は $e_{\max}=1.526$ 、平均最小間隙比は $e_{\min}=0.940$ であり、天然砂よりも大きい。これは水砕スラグの粒子形状が角張っていることや、粒径が比較的均一である (3.1.3 粒度参照) ことによると考えられる。

このように、水砕スラグは間隙比が大きいため、土粒子密度は天然砂と同等であるが、平均最小密度は 1.10g/cm^3 、平均最大密度は 1.43g/cm^3 と、天然砂よりも小さい。

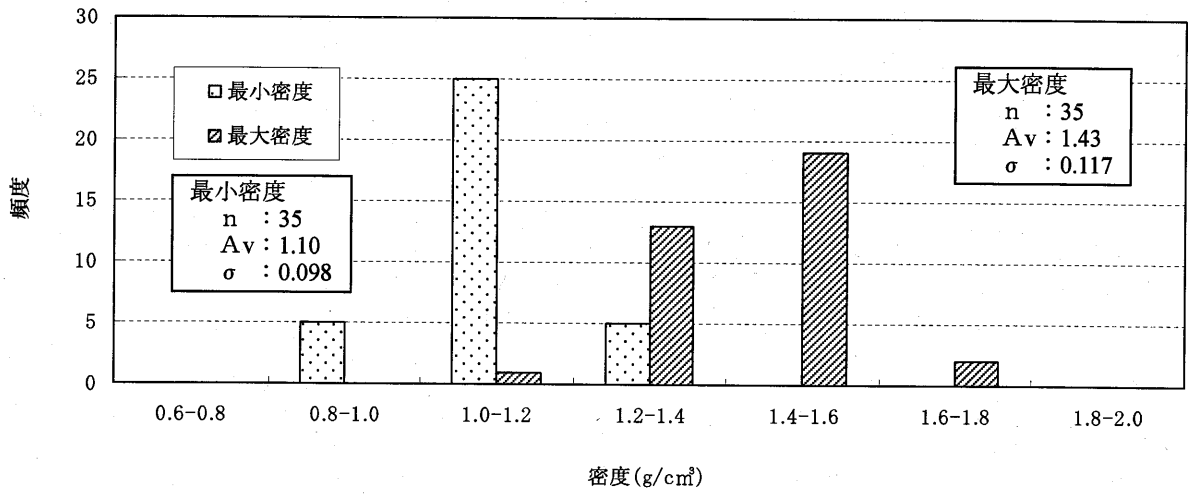


図 3.1.2 水砕スラグの最大・最小密度

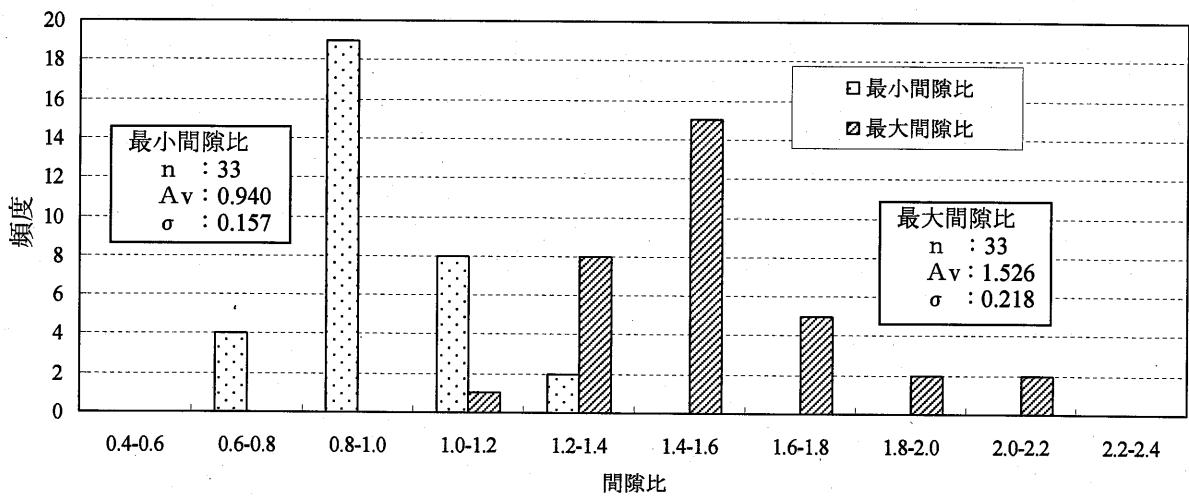


図 3.1.3 水砕スラグの最大・最小間隙比

表 3.1.1 水砕スラグと天然材の間隙比および最大・最小密度の比較

	最大間隙比 e_{max}	最小間隙比 e_{min}	最大密度 g/cm^3	最小密度 g/cm^3
水砕スラグ平均	1.526	0.940	1.43	1.10
玄海砂	0.802	0.493	1.78	1.48

3.1.2. 単位体積重量

水砕スラグの湿潤単位体積重量は概ね $11\text{kN/m}^3 \sim 16\text{kN/m}^3$ である。また、設計に用いる水砕スラグの単位体積重量は、用途や利用条件などを踏まえ、適切に設定する。

【解説】

(1) 水砕スラグの最大乾燥密度

図 3.1.4 は、2005 年に全国の 13 製鉄所で製造された水砕スラグの、JIS A 1210 「突固めによる土の締固め試験」によって求められた最大乾燥密度である。最大乾燥密度の全国の平均値は 1.45g/cm^3 であった。

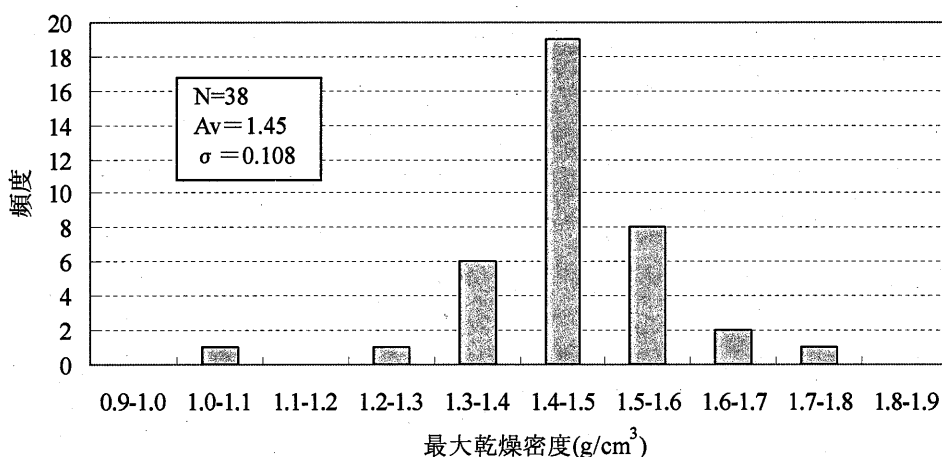


図 3.1.4 水砕スラグの最大乾燥密度（締固め試験）

(2) 水砕スラグの単位体積重量

これまで、構造物の設計における水砕スラグの単位体積重量は、「元年度版利用手引書」をもとに、湿潤単位体積重量 $\gamma_t = 13\text{kN/m}^3$ 、水中単位体積重量 $\gamma' = 7\text{kN/m}^3$ が用いられてきた。しかし、「3.1.1 土粒子密度および間隙比」で示したように、現在製造されている水砕スラグは、平成元年度当時よりも土粒子密度が大きくなっている。また、これまでに実際に使用された水砕スラグの調査においても、これらの値より大きい単位体積重量を示すケースが見られた。これらの実情を踏まえ、本技術資料では、設計に用いる単位体積重量を以下のように設定した。

1) 設計に用いる湿潤単位体積重量

水砕スラグを土工用材料として用いた場合、盛土などの締固め作業では、締固め度(現場密度/最大乾燥密度)が 90%以上となるように施工管理されることが多い。また、水砕スラグの自然含水比は概ね 5~15%であり、平均的な含水比は 10%程度である。

これらを踏まえ、全国の 13 製鉄所で製造された水砕スラグの最大乾燥密度の平均値

1.45g/cm³をもとに、水砕スラグの締固め度を90%、含水比5~15%として湿潤単位体積重量を推定したものを図3.1.5に示す。水砕スラグの湿潤単位体積重量は概ね $\gamma_t=11\sim 16\text{kN/m}^3$ の範囲である。

本技術資料では、含水比を10%とした場合の平均湿潤単位体積重量をもとに、設計に用いる湿潤単位体積重量の標準値を $\gamma_t=14.5\text{kN/m}^3$ とした。設計においてはこの値を使用してよいが、水砕スラグの単位体積重量には製鉄所間の差異があるため、重要構造物の設計にあたっては、使用が予想される水砕スラグについて、事前に単位体積重量を確認することが望ましい。

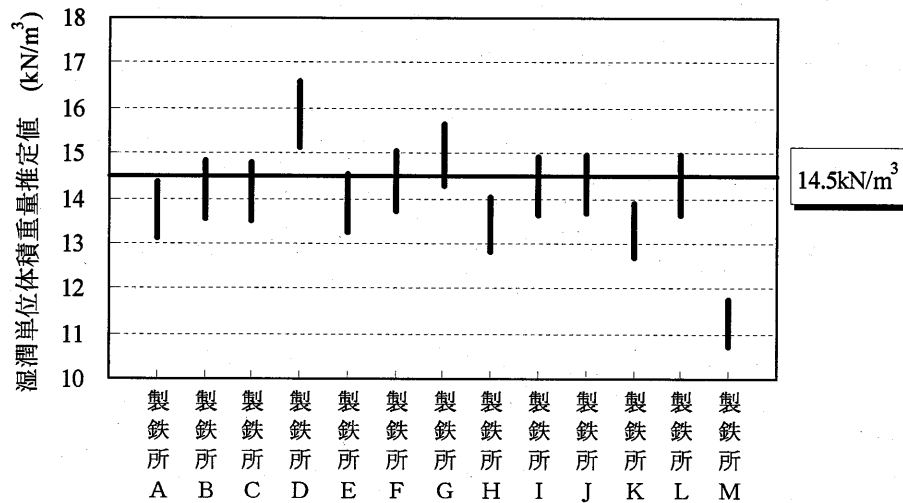


図 3.1.5 現場での湿潤単位体積重量の推定値 (締固め度90%, w=5~15%と仮定)

2) 設計に用いる湿潤単位体積重量と実測値との比較

図3.1.6は、水砕スラグ(土粒子密度 $\rho_s=2.77\text{g/cm}^3$)を用いた試験盛土(盛土厚2m)の湿潤単位体積重量(現場密度試験結果を単位体積重量に換算)である。この事例では、現場での実測値は12.0~14.5kN/m³であり、設計に用いる標準値 $\gamma_t=14.5\text{kN/m}^3$ と比較してやや小さめの値となる。

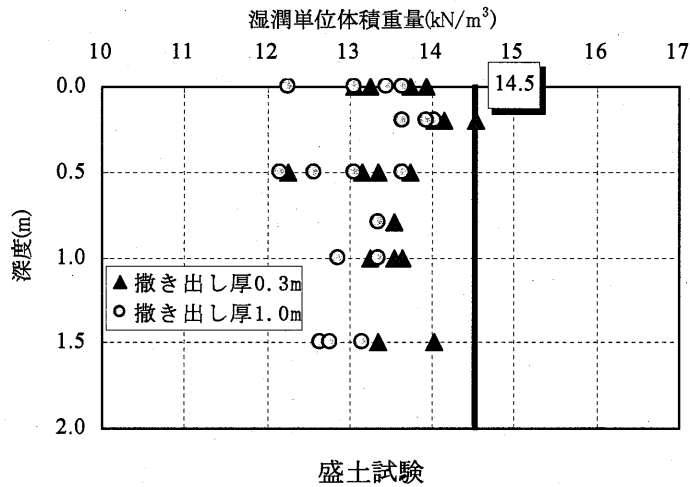


図 3.1.6 設計に用いる湿潤単位体積重量と実測値との比較 (試験盛土) ⁵⁾に加筆

図 3.1.7 は、埋立地の覆土に用いた水砕スラグの湿潤単位体積重量 (現場密度試験結果を単位体積重量に換算) である。この事例では、現場での実測値は $12.5 \sim 15.5 \text{ kN/m}^3$ であり、設計に用いる標準値 $\gamma_t = 14.5 \text{ kN/m}^3$ と比較すると平均的な値となる。

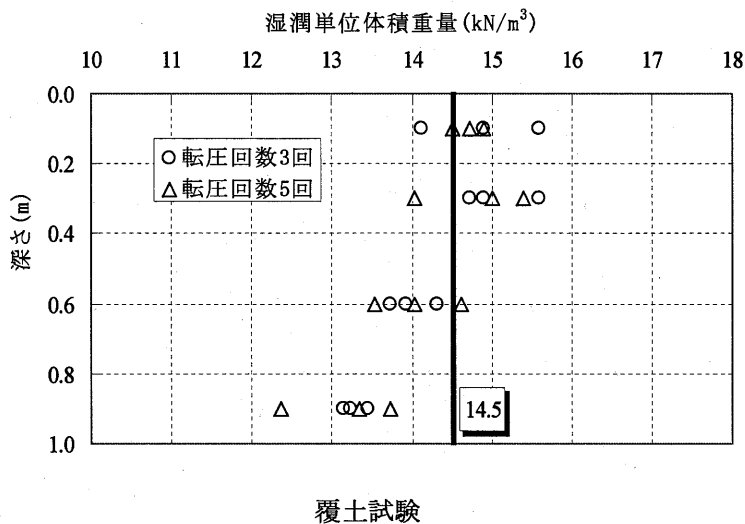


図 3.1.7 設計に用いる湿潤単位体積重量と実測値との比較 (覆土) ⁶⁾に加筆

なお、水砕スラグの飽和単位体積重量が必要な場合には、「利用マニュアル」を参考にすることができる。「利用マニュアル」では、飽和単位体積重量を $\gamma_{\text{sat}} = 17.5 \text{ kN/m}^3$ (特性値) と設定している。

3.1.3. 粒度

水砕スラグの粒度分布は、一般的に図 3.1.8 に示される範囲である。

【解説】

全国の 12 製鉄所で製造された水砕スラグの粒度試験結果を図 3.1.8 に示す。水砕スラグの標準的な粒径は 4.75mm 以下であり、細粒分(0.075mm 以下)は 1~2%程度と少ない。また、均等係数 U_c は 2.68~4.33 と小さく、“分級された砂”または“分級された礫まじり砂”に分類される。

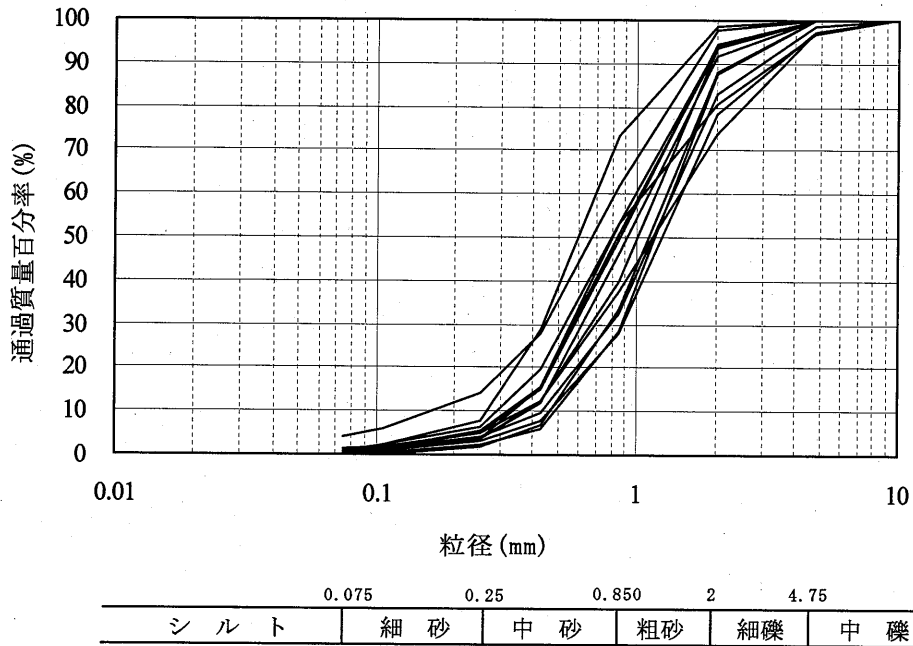


図 3.1.8 一般的な水砕スラグの粒度分布

3.1.4. 透水性

固結していない水砕スラグの透水係数は概ね $1 \times 10^0 \sim 1 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ であるが、固結に伴い低下する。

【解説】

水砕スラグは細粒分が少ないため、固結(3.3 水砕スラグの固結特性参照)していない状態では高い透水性を有する。図 3.1.9 は、全国の10製鉄所で製造された水砕スラグについて、JIS A 1218「土の透水試験方法」(定水位透水試験)によって測定した透水係数を示したものである。締固めた水砕スラグの固結していない状態での透水係数は $10^0 \sim 10^{-2} \text{ cm/s}$ 程度である。

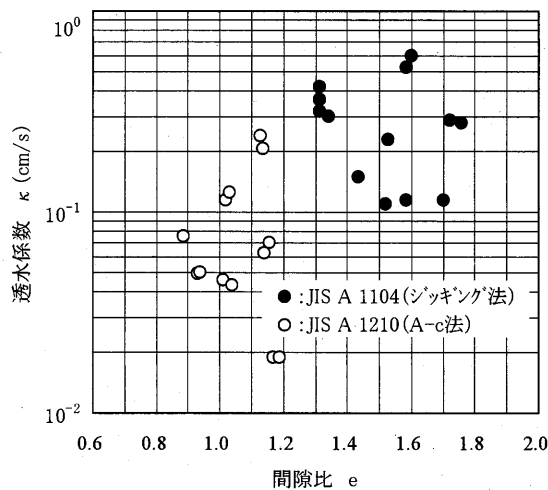


図 3.1.9 未固結水砕スラグの透水係数⁷⁾

水砕スラグの透水性は、固結が進行すると低下する傾向がある。図 3.1.10 は、水砕スラグを所定の密度でモールドに詰め、上水および海水中にて養生した後定水位透水試験を行い、透水係数および間隙比の経時変化を調べたものである。初期状態の透水係数は 10^{-1} cm/s 程度であったが、経時的に間隙比の減少および透水係数の低下が見られ、1年後に透水係数は $2 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 程度に低下した。

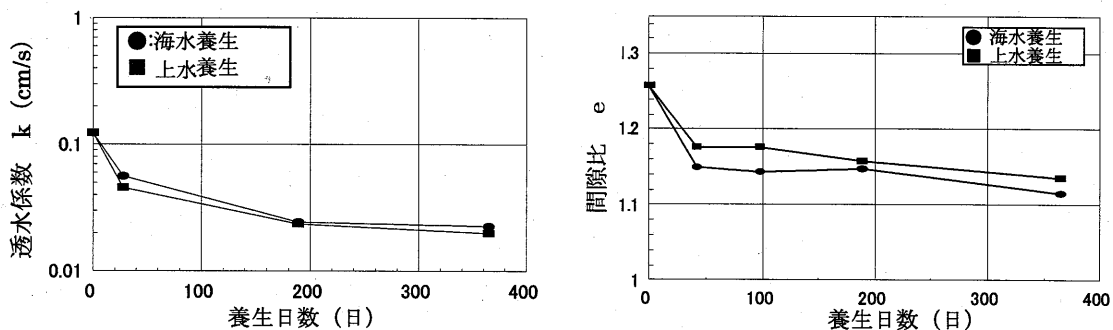


図 3.1.10 水砕スラグの透水係数および間隙比の経時変化^{8), 9)}

図 3.1.11 は、和歌山県下津港の埋立地の覆土材として使用した水砕スラグの現場透水試験結果を示したものである。施工直後では透水係数は $2 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 程度であるが、施工後 8 ヶ月以降では $3 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 以下に低下している。

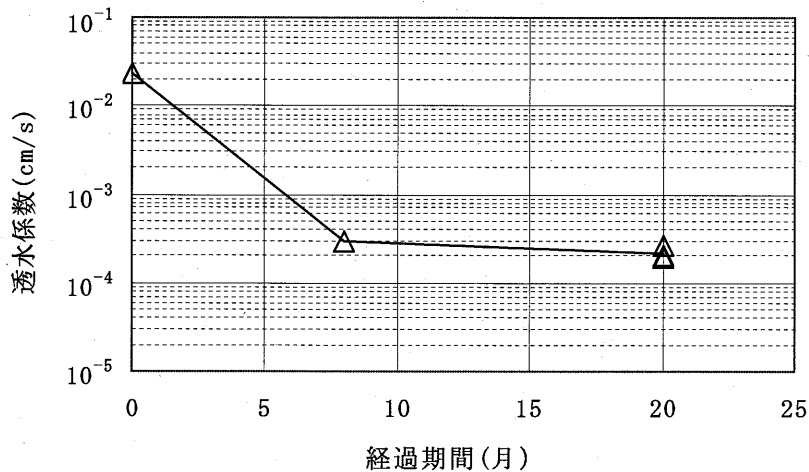


図 3.1.11 現場透水試験による覆土材の透水係数(cm/s)¹⁰⁾

海底地盤中のサンドコンパクションパイルに水砕スラグを用いた場合には、締固めに伴う粒子破碎の影響により固結が促進され、透水係数は施工後 6 ヶ月で $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ cm/s}$ 程度にまで低下したことが報告されている¹¹⁾。したがって、水砕スラグをサンドコンパクションパイルに使用する場合には、この点を踏まえて使用する必要がある。

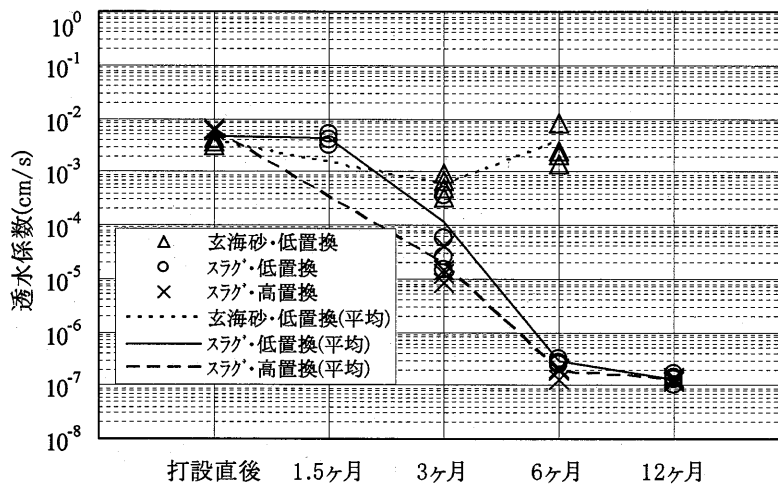


図 3.1.12 サンドコンパクションパイルに用いた水砕スラグの透水係数の経時変化¹¹⁾

3.1.5. 締固め特性

締固めた水砕スラグの乾燥密度は、締固め時の含水比にほとんど影響されない。また、水砕スラグは締固めに伴い粒子破碎を生じるが、その程度は締固めの条件によって異なる。

【解説】

図 3.1.13 は、2005 年に全国の 9 製鉄所で製造された水砕スラグの JIS A 1210「突固めによる土の締固め試験」によって求められた含水比と乾燥密度との関係を示している。水砕スラグの最適含水比を見出すことは困難であり、乾燥密度は含水比の影響を受けずほぼ一定値を示す傾向がある。

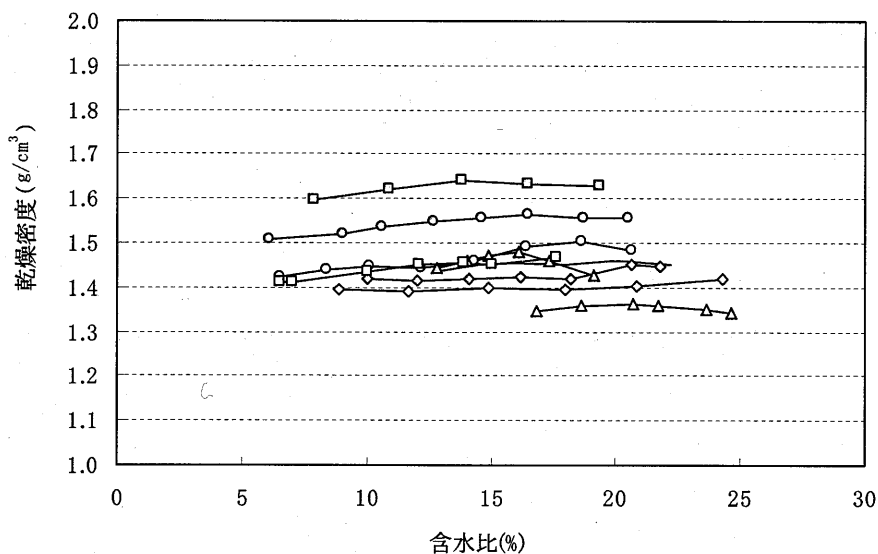


図 3.1.13 水砕スラグの締固め試験結果

表 3.1.2 は、平成 9 年に千葉県内で行われた、水砕スラグを路床として用いた試験施工の結果であるが、路床表面から 30cm までは締固め度 90%以上を確保できている。

表 3.1.2 路床に用いた水砕スラグの締固め度¹²⁾に加筆

	測定深さ	現場密度 (g/cm ³)	最大乾燥密度 (g/cm ³)	締固め度 (%)
A 現場	表面	1.33	1.36	98
	30cm	1.24	1.36	91
B 現場	表面	1.13	1.18	96
	30cm	1.06	1.18	90
C 現場	表面	1.41	1.42	99
	20cm	1.32	1.42	93
	40cm	1.24	1.42	88

図 3.1.14 は、締固め試験の前後の粒度分布の違いを示したものであるが、粒子破碎による粒度の変化はほとんど生じていない。図 3.1.15 は、水砕スラグと玄海砂の密詰め試料(相対密度 $D_r=80\%$) を用いて拘束圧 500kPa のもとで三軸圧縮試験を行い、試験前後の粒度分布の変化を示したものであるが、天然砂(玄海砂)よりも水砕スラグの方が粒子破碎の程度が大きい。

これらより、覆土などに用いた場合とサンドコンパクションパイルに用いた場合とでは、粒子破碎の程度が異なると考えられる。

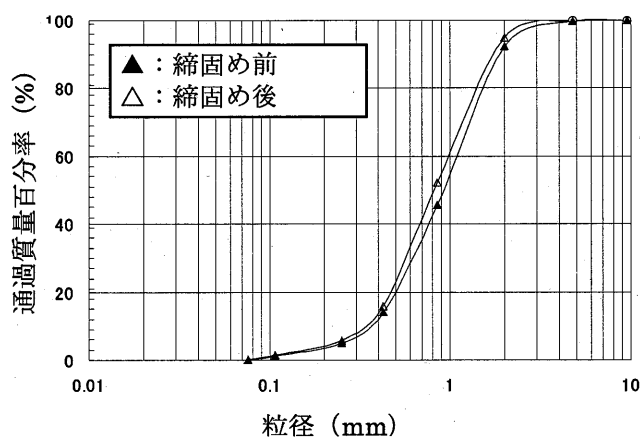
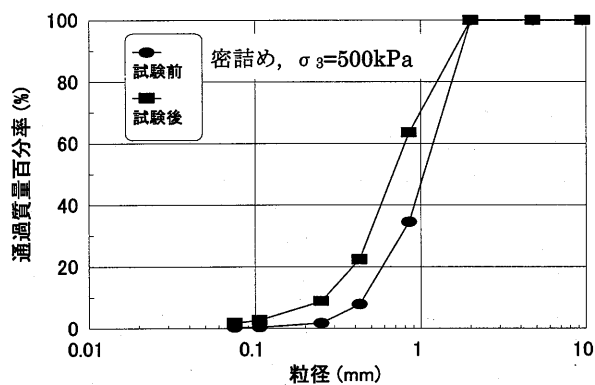
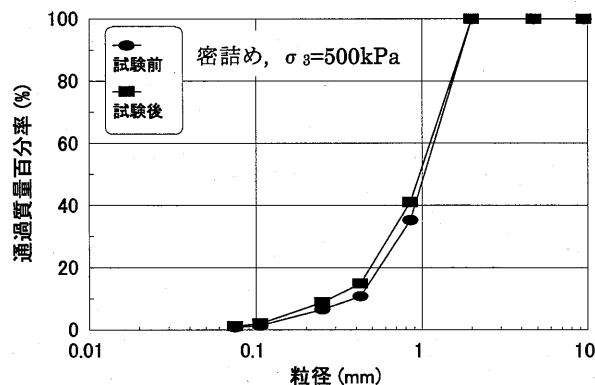


図 3.1.14 締固め試験前後の粒度の変化¹³⁾



水砕スラグ



玄海砂

図 3.1.15 三軸圧縮試験前後の粒度の変化(拘束圧 500kPa)¹⁴⁾

3.1.6. CBR 特性

水砕スラグの設計 CBR は、概ね 20~30%である。

【解説】

図 3.1.16 は、全国の 13 製鉄所で製造された水砕スラグの設計 CBR 試験結果である。水砕スラグの CBR は概ね 20~30%であり、路床材として十分な CBR が得られている。また、「3.1.5 締固め特性」で示したように、水砕スラグの締固め度は含水比に依存しないため、水砕スラグの CBR は含水比の影響をあまり受けないと考えられる。

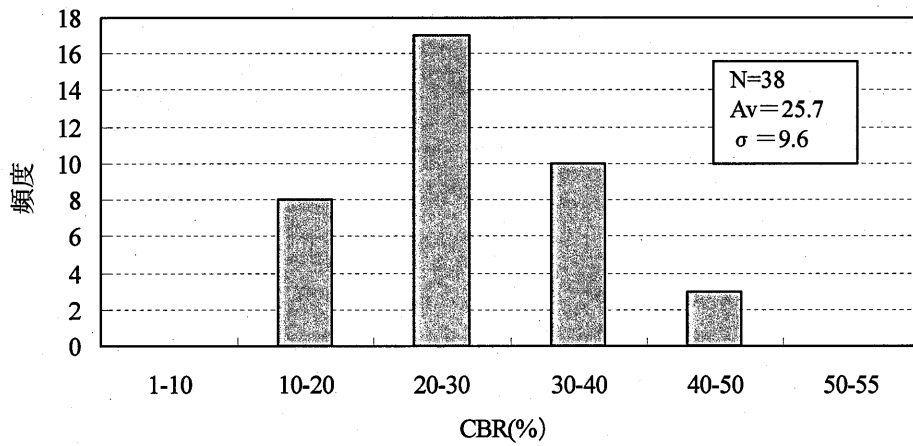


図 3.1.16 水砕スラグの CBR

図 3.1.17 は、水砕スラグを道路の路床材として用いた試験施工(撒き出し厚 1.0m)における、現場 CBR の経時変化である。このように、水砕スラグは水硬性を有しているため、施工後の CBR は固結に伴い経時的に増加する。

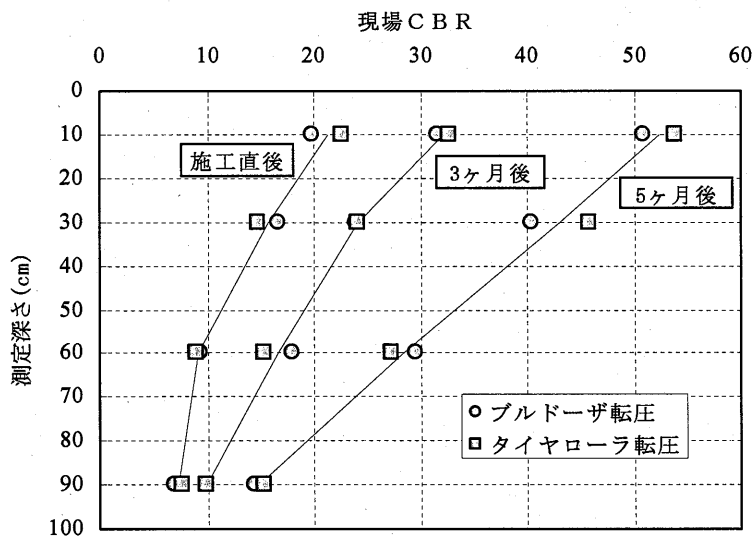


図 3.1.17 路床に用いた水砕スラグの現場 CBR の経時変化¹⁵⁾に加筆

3.1.7. 沈下特性

水砕スラグは、浸水による沈下（コラップス沈下）は生じない。

【解説】

図 3.1.18 は、乾燥状態の水砕スラグとマサ土に荷重し、荷重した状態で注水した時の沈下量を示したものであるが、水砕スラグは荷重後 100 秒以内に沈下がほぼ終了している。また、荷重した状態で注水しても、マサ土に見られるような浸水による沈下（コラップス沈下）は生じない¹⁶⁾。

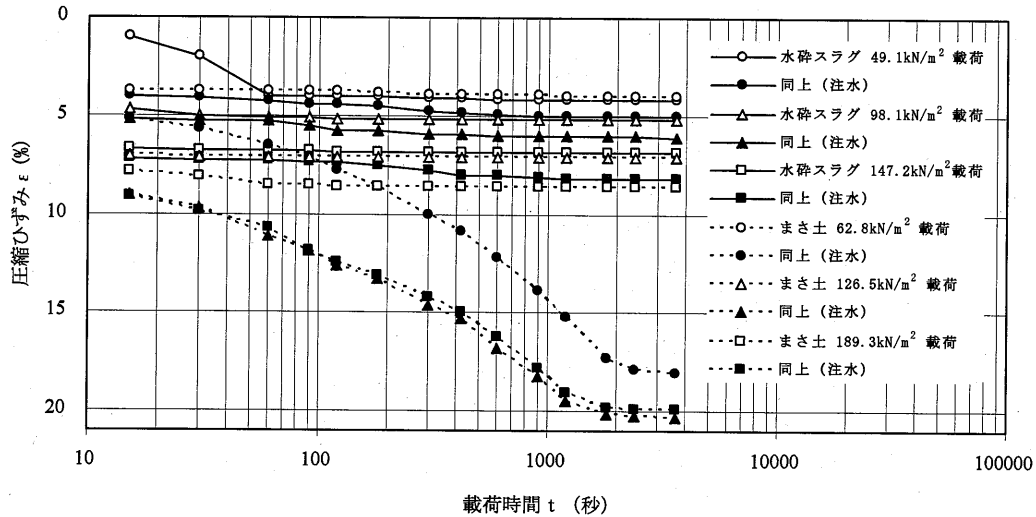


図 3.1.18 水砕スラグの注水-沈下特性¹⁶⁾に加筆

図 3.1.19 は、水砕スラグの圧縮沈下特性について標準圧密試験を行い天然砂と比較したものである。なお、試験では粘土の圧密試験と同様の荷重を段階的に荷重し、各荷重段階は 60 分としている。水砕スラグは天然砂と比較して初期間隙比および粒子破碎の程度が大きいいため、荷重に伴う空隙比の低下が天然砂より大きい。

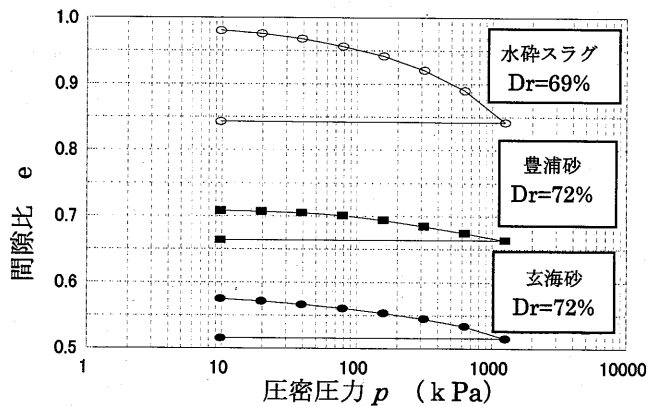


図 3.1.19 水砕スラグと天然砂の e-logP 関係¹⁷⁾

3.2. 化学的性質

3.2.1. 化学成分

水砕スラグの主な成分は、CaO、SiO₂、Al₂O₃、MgO などである。

【解説】

水砕スラグの主成分はCaO(ライム)、SiO₂(シリカ)、Al₂O₃(アルミナ)、MgO(マグネシア)で、その他少量のMn(マンガン)、Fe(鉄)の化合物、S(硫黄)などを含有している。これらの成分は、天然の砂又は岩石などにも含まれており、セメントの成分構成と類似している。表 3.2.1 に水砕スラグ、セメントおよび天然岩石の成分例を示す。

表 3.2.1 化学成分例

単位：質量%

種 類 \ 化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	MnO	FeO
水 砕 ス ラ グ	33.4	14.5	41.0	6.0	1.0	0.7	0.4
普通ポルトランドセメント	22.0	5.5	65.0	1.4	1.0	—	3.0
天 然 石 (山 砂)	60.0	22.0	0.5	0.8	0.1	0.1	—
安 山 岩	60.0	17.0	6.0	3.0	0.2	1.0	3.0
山 土	59.6	22.0	0.4	0.8	0.01	0.1	—

3.2.2. 溶出

(1) 有害物質

水砕スラグからの有害物質の溶出量、および水砕スラグの有害物質の含有量は、いずれも土壤環境基準等の基準値以下である。

(2) 溶出水の pH

水砕スラグからの溶出液はアルカリ性を呈するため、土工用材料として用いた場合、水砕スラグ中の間隙水や直下部の地下水は高 pH 状態となるが、周辺域においては、土壌による吸着・中和作用や地下水による希釈により、pH は低減される。

【解説】

(1) 有害物質

水砕スラグは古くから安全な土工用材料として利用されているが、環境安全面での品質基準に係る規格がなかったため、昭和 48 年環境庁告示第 13 号および JIS K 0102(工場排水試験法)に基づき重金属の溶出がないことを確認していた。その後土壤環境基準(平成 3 年環境庁告示第 46 号)や、土壤汚染対策法(平成 14 年法律第 53 号)に基づく指定区域の指

定に係る基準が制定された。また平成 17 年 3 月には、スラグ類の有効利用を促進するために JIS K 0058-1「スラグ類の化学物質試験方法—第 1 部：溶出量試験方法」、JIS K 0058-2「スラグ類の化学物質試験方法—第 2 部：含有量試験方法」が制定された。表 3.2.2 および表 3.2.3 に(財)化学物質評価研究機構で実施した水砕スラグの溶出量試験結果と含有量試験の例を示すように、水砕スラグは有害物質の溶出量および含有量はいずれも基準値以下である。

表 3.2.2 JIS K 0058-1 による水砕スラグの溶出量試験結果例

単位：mg/l

項目	土壤環境基準	試験結果	定量下限
Cd	0.01 以下	不検出	0.001
Pb	0.01 以下	不検出	0.005
Cr ⁶⁺	0.05 以下	不検出	0.02
As	0.01 以下	不検出	0.001
T-Hg	0.0005 以下	不検出	0.0005
Se	0.01 以下	不検出	0.001
F	0.8 以下	0.3	0.1
B	1 以下	不検出	0.1

表 3.2.3 JIS K 0058-2 による水砕スラグの含有量試験結果例

単位：mg/kg

項目	含有量基準*	試験結果	定量下限
Cd	150 以下	不検出	10
Pb	150 以下	不検出	10
Cr ⁶⁺	250 以下	不検出	20
As	150 以下	不検出	10
T-Hg	15 以下	不検出	1
Se	150 以下	不検出	10
F	4000 以下	520	20
B	4000 以下	不検出	400

※土壤汚染対策法（平成 14 年法律第 53 号）に基づく指定区域の指定に係る基準

ここでは JIS A 5032「一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を熔融固化した道路用熔融スラグ」で規定する 8 物質としているが、JSTM H 8001「土工用製鋼スラグ砕石」では製造プロセス上製鋼スラグに混入の可能性のない物質は除外して、鉛、六価クロム、セレン、ふっ素、ほう素の 5 物質としている。したがって水砕スラグは高炉スラグであるので、鋼を製造するときに添加する鉛と六価クロムを除外することができる。また、当然ではある

が、水砕スラグは 1,500°C 以上の熔融状態から急冷されるため、有機物やダイオキシンは含まない。

(2) 溶出水の pH

水砕スラグからの溶出水は、 $\text{pH}=10\sim12$ のアルカリ性を示す。菊池らは、施工後 6~9 年経過した水砕スラグの埋立地盤での調査結果から、水砕スラグ地盤の間隙水は長期間経過しても高 pH 状態にある¹⁸⁾ことや、水砕スラグを裏込め材として用いた埋立て地盤についての調査結果から、間隙水の移流の少ないところでは間隙水が $\text{pH}=10\sim12$ の高 pH 状態になる¹⁹⁾ことを報告している。

このように、水砕スラグ地盤での間隙水の pH は高いが、その周辺域においては、周辺土壌の陽イオン交換による吸着や土壌有機物による中和、また地下水による希釈などにより pH は低減される。富永らは、沼地の表層処理工法として用いられた水砕スラグについて調査を行い、水砕スラグ地盤内では pH の上昇が見られたが、水砕スラグ地盤から 3m 以上離れた水域ではほとんど影響がない²⁰⁾ことや、1 年経過後において、水砕スラグ地盤内の水の pH は減少傾向にあるものの中性域に達するには相当の日数を要すること、また水砕スラグ地盤から 3m 以上離れた水域では依然として中性域である²¹⁾ことを報告している。

水砕スラグを用いた試験盛土の直下および周辺地下水の調査結果では、盛土中央や法尻など水砕スラグ撒き出し区域の直下では地下水の pH が最大 12 程度にまで上昇するが、水砕スラグ撒き出し区域から数メートル離れた地点では pH の上昇は生じていない²²⁾ことが確認されている。

このように、水砕スラグの溶出水は強アルカリ性を示すため、水砕スラグ施工域の間隙水や直下の地下水は $\text{pH}=10\sim12$ の高 pH 状態となるが、その影響は直近のごく一部に限られ、それ以外の区域では土壌の吸着・中和作用や地下水による希釈などにより、pH は低減される。ただし、周辺地盤の土壌が礫や砂等、吸着能力の低い土壌の場合には注意を要する。

3.3. 水砕スラグの固結特性

水砕スラグはガラス構造で化学的反応性が高く、経時的に水和反応が進み固結する。また、細粒化やアルカリ刺激剤の添加などにより、固結を促進させることができる。

【解説】

高炉スラグの主要成分は、CaO(ライム)、SiO₂(シリカ)、Al₂O₃(アルミナ)、MgO(マグネシア)の4成分である。このような組成を有する珪酸塩熔融体を徐々に冷却すると、メリライト(2CaO・Al₂O₃・SiO₂:ゲーレンナイト、2CaO・MgO・2SiO₂:オケルマナイトの固溶体)を主体とする珪酸塩結晶となるが、水砕スラグは多量の水により急冷するため、結晶を生成しないまま凝固し、ガラス構造となる。

珪酸塩結晶は、[SiO₄] 4面体が規則的に配列し化学的に安定であるのに対し、ガラス構造は化学的に不安定な状態にあり反応性が高い。そのため、水砕スラグには経時的に水和反応が進み固結する性質(水硬性)がある。水砕スラグの固結は、一般に次のようなプロセスで進行するものと考えられている。

- ①アルカリ雰囲気の中では、水砕スラグのガラス構造を形成している[SiO₄]のネットワークが切断される。
- ②ネットワークの切断が一旦始めると、含有しているCaOやMgOなどのアルカリ性物質が溶出しアルカリ雰囲気が保たれるので、ネットワークの切断は継続され、ガラスの水への溶出が進む。
- ③溶出したCaO、SiO₂、Al₂O₃などによりポルトランドセメントと同様の水和反応が起こり、CaO-SiO₂-H₂O(珪酸カルシウム水和物)およびCaO-Al₂O₃-H₂O(カルシウム-アルミネート水和物)が生成する。

水砕スラグの固結速度は比較的緩やかであるが、細粒化やアルカリ刺激剤の添加などにより固結を促進させることができる。アルカリ刺激剤の種類および添加量と水硬性の関係については、多くの調査・研究事例があり、既に商品化されているものもある。

アルカリ刺激剤としては、ポルトランドセメント、消石灰、転炉スラグ粉などが用いられ、添加量は一般に遊離CaOの換算で3~10%程度である。アルカリ刺激剤の添加により固結が促進され、通常は、1週間後には一軸圧縮試験が十分行える程度に固結する。また、強度が長期にわたって伸び続ける傾向がある。図3.3.1に各種アルカリ刺激剤の添加による一軸圧縮強さの経時変化を示す。

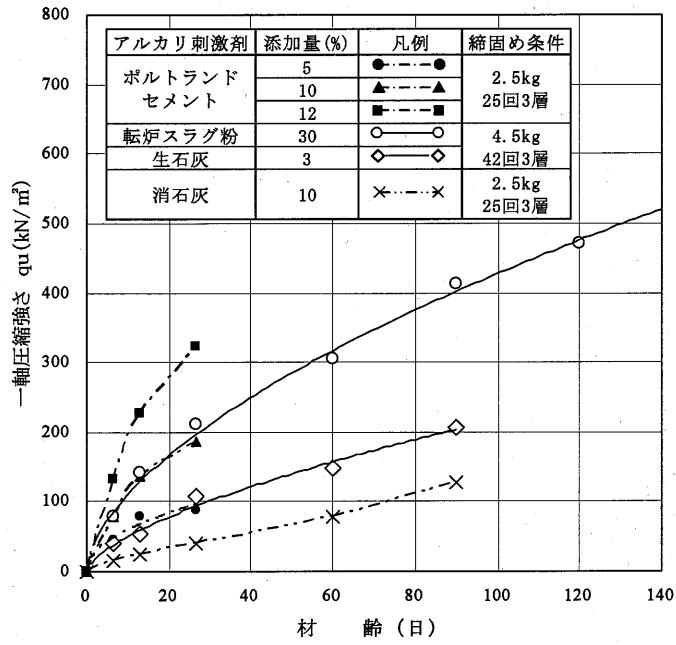


図 3.3.1 各種アルカリ刺激剤による水砕スラグの一軸圧縮強さ

3.4. 力学的性質

3.4.1. 固結していない水砕スラグのせん断強度特性

(1) せん断強度特性

固結していない水砕スラグのせん断強度特性は、せん断抵抗角で表現することができ、その値は概ね 35° 以上を示す。

(2) 設計に用いるせん断抵抗角

固結していない水砕スラグの設計に用いるせん断抵抗角は、用途や利用条件などを踏まえ、適切に設定する。

【解説】

(1) せん断強度特性

固結していない水砕スラグのせん断強度特性は、天然砂と同様にせん断抵抗角で表現することができる。表 3.4.1 は、固結していない水砕スラグと天然砂(玄海砂)の単純せん断試験結果である。試験では、水浸した試料を真空脱気した後せん断容器に所定の相対密度になるよう詰め、圧密圧力を 49kN/m^2 、 98kN/m^2 、 147kN/m^2 として、定体積条件でせん断を行っている。このように、水砕スラグのせん断抵抗角は天然砂よりも大きい。

表 3.4.1 水砕スラグのせん断抵抗角²³⁾に加筆

	ϕ' (Dr=60%)	ϕ' (Dr=80%)
水砕スラグ	41.3° ($e=1.027$)	43.4° ($e=0.936$)
玄海砂	36.3° ($e=0.640$)	42.0° ($e=0.578$)

図 3.4.1、図 3.4.2 は、水砕スラグと天然砂の主働土圧を同一条件のもとで測定した現場実験の例である。両側にコンクリート壁、前面に鋼製の受圧板をもつ土槽(図 3.4.1)に盛土層をつくり、受圧板の上端に変位を与えながら受圧板に作用する土圧 P_A を測定し、土圧の実測値および観察された崩壊面からせん断抵抗角を求めている。結果を図 3.4.2 および表 3.4.2 に示すが、いずれの計算方法でも水砕スラグのせん断抵抗角は天然砂よりも $6\sim 7^\circ$ 大きい。

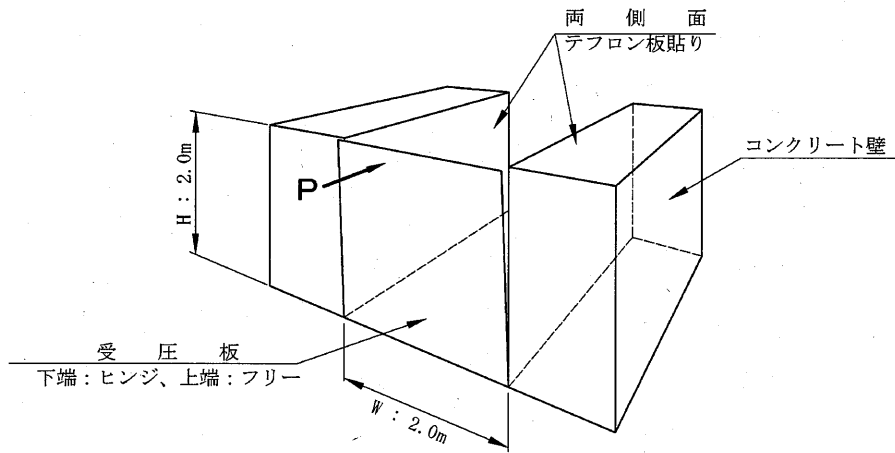


図 3.4.1 現場実験装置²⁴⁾に加筆

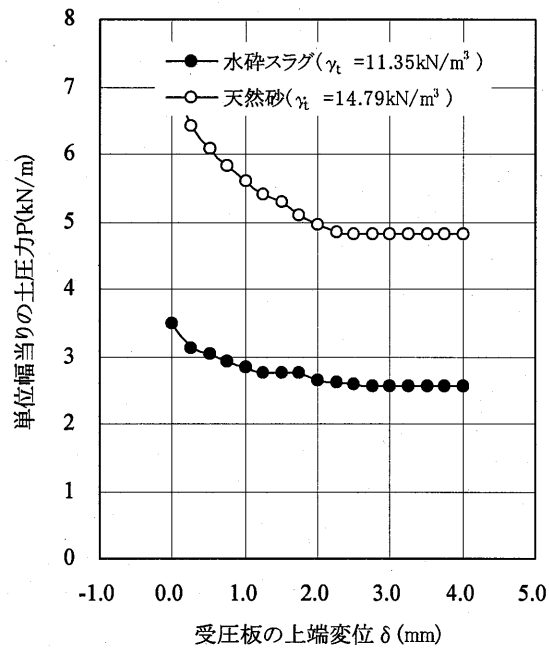


図 3.4.2 受圧板上端の変位に対する実測土圧²⁴⁾に加筆

表 3.4.2 測定結果より得られたせん断抵抗角²⁴⁾に加筆

	水砕スラグ	天然砂(海砂)	備考
土圧の実測値から求めた ϕ	52.7°	46.0°	$P_A = 1/2 \gamma H^2 \tan^2(45^\circ - \phi/2)$
観察された崩壊面から求めた ϕ	41.9°	35.0°	$\theta = 45^\circ + \phi/2$ (θ : 崩壊角)

図 3.4.3 は、固結していない水砕スラグについて、拘束圧を $\sigma_r=49\sim 392\text{kN/m}^2$ として行った排水三軸圧縮試験の結果を示したものである。図には、粘着成分を無視し各応力円に対して原点を通る接線から求めたせん断抵抗角 ϕ_0 を示しているが、拘束圧の増加に伴い ϕ_0 が低下している。これは、せん断時の粒子破碎の影響によるものと考えられる。このように、水砕スラグのせん断抵抗角は拘束圧依存性を有するが、通常の施工条件として想定される $100\sim 200\text{kN/m}^2$ 程度の拘束圧であれば、水砕スラグのせん断抵抗角として 35° 程度は確保できると考えられる。

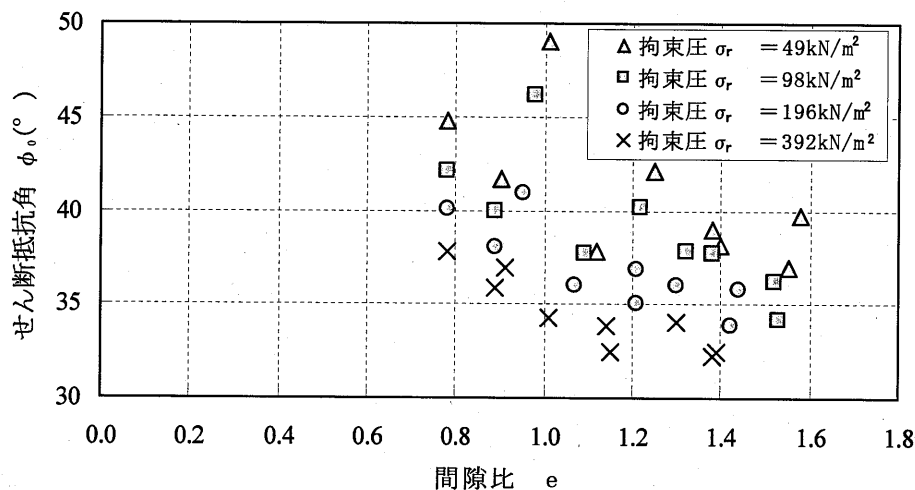


図 3.4.3 未固結状態の水砕スラグのせん断抵抗角²⁵⁾をもとに作成

(2) 設計に用いるせん断抵抗角

未固結状態の水砕スラグのせん断抵抗角には拘束圧依存性があるため、水砕スラグのせん断強度定数を設定するにあたっては、用途を踏まえて適切な値を設定する。これまでの土木構造物の設計においては、水砕スラグのせん断抵抗角は 35° とされていたが、通常の使用条件として $100\sim 200\text{kN/m}^2$ 程度の拘束圧を想定すると、これは安全側の設定といえる(図 3.4.3 参照)。拘束圧の小さい条件下で用いる場合、これよりも大きなせん断抵抗角を期待することができるが、せん断抵抗角の設定にあたっては、実際に使用する水砕スラグのせん断特性を十分把握して設定することが望ましい。

なお、港湾構造物の場合は、平成 19 年度の「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の改訂において、設計体系がこれまでの仕様規定型から性能規定型へと移行した。それに伴い、「利用マニュアル」では、拘束圧が 100kN/m^2 以下の条件下で用いる場合には、水砕スラグのせん断抵抗角は、 $\phi_k=38^\circ$ を特性値としてよい²⁶⁾としている。

3.4.2. 固結した水砕スラグのせん断強度特性

(1) せん断強度特性

水砕スラグのせん断強度は、固結に伴い増加する。

(2) 固結による強度増加の扱い

水砕スラグの固結によるせん断強度の増加は、設計上は原則として考慮しない。

【解説】

(1) せん断強度特性

1) 固結によるせん断強度の増加

水砕スラグのせん断抵抗角および粘着力は、固結に伴い経時的に増加する。図 3.4.4 は、水砕スラグをモールドに詰めた状態で海水中と水道水中で養生した後、排水三軸圧縮試験を行った結果である。なお、破壊包絡線は養生 0 日においては $c=0\text{kPa}$ とし、養生後では $c\neq 0$ とし直線近似している。図に示すように、海水養生、水道水養生いずれのケースでも c および ϕ が増加している。

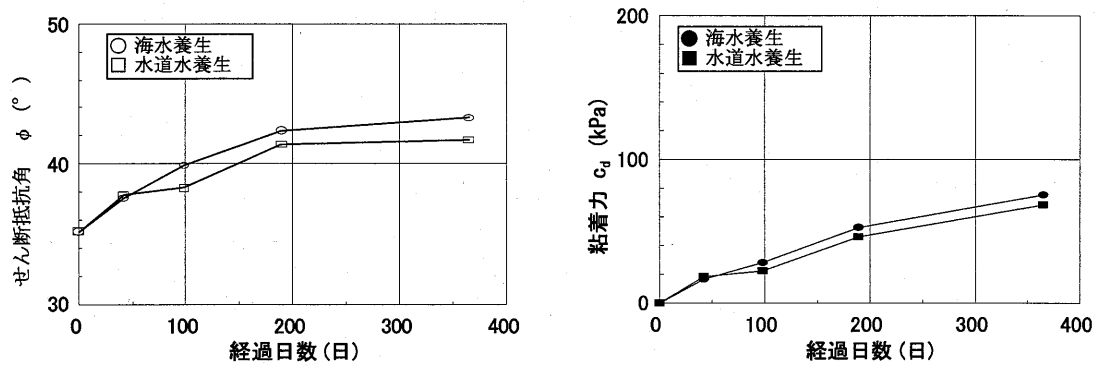


図 3.4.4 水砕スラグのせん断抵抗角および粘着力の経時変化^{27), 28)}

図 3.4.5 は、浚渫土で埋立てた地盤上に撒き出した水砕スラグ(20m×20m, 厚さ 50cm)に対してスウェーデン式サウンディング試験を行い、結果を N 値に換算して経時変化を調査したものである。換算 N 値の算出には、 $N=2+0.067N_{sw}$ (N_{sw} : 貫入量 1m 当りのロッドの半回転数 (回/m)) を用いている。施工後 2 ヶ月以降に換算 N 値が激しく増加しており、施工 3 ヶ月後以降では $N>50$ となっている。また、深度が増すほど固結の程度が大きいとしている²⁹⁾。

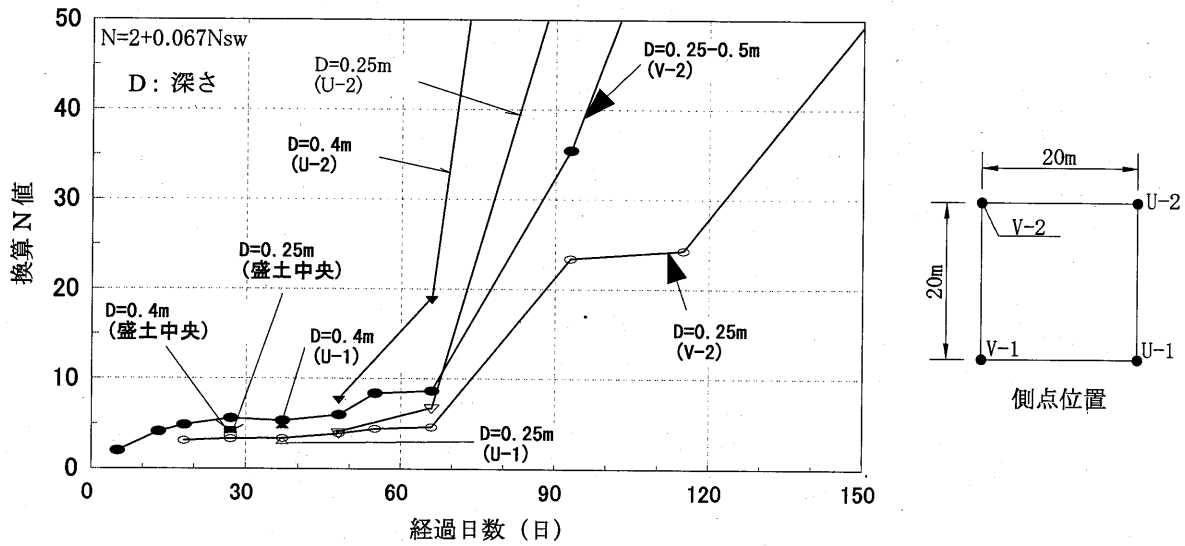


図 3.4.5 埋立地に撒き出した水砕スラグの換算 N 値の経時変化²⁹⁾に加筆

図 3.4.6 は、埋立地の覆土に用いた水砕スラグについて N 値の経時変化を示したものであるが、転圧回数にかかわらず N 値が経時的に増加している。

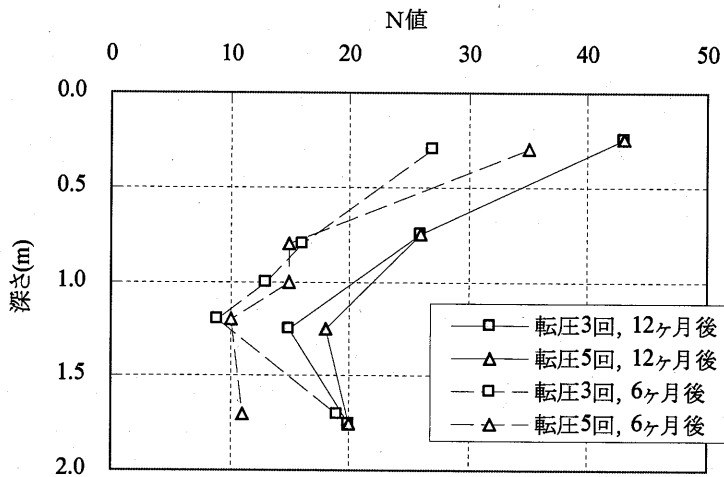


図 3.4.6 覆土に用いた水砕スラグの N 値の経時変化³⁰⁾に加筆

2) 固結に伴う水砕スラグのせん断特性の変化

図 3.4.7 は、水砕スラグの排水三軸圧縮試験結果例である。固結した水砕スラグではせん断途中で最大強度が現れ、ひずみが大きくなると強度はほぼ一定値(残留強度)に近づく傾向を示すが、未固結の水砕スラグではこのような傾向は見られない。

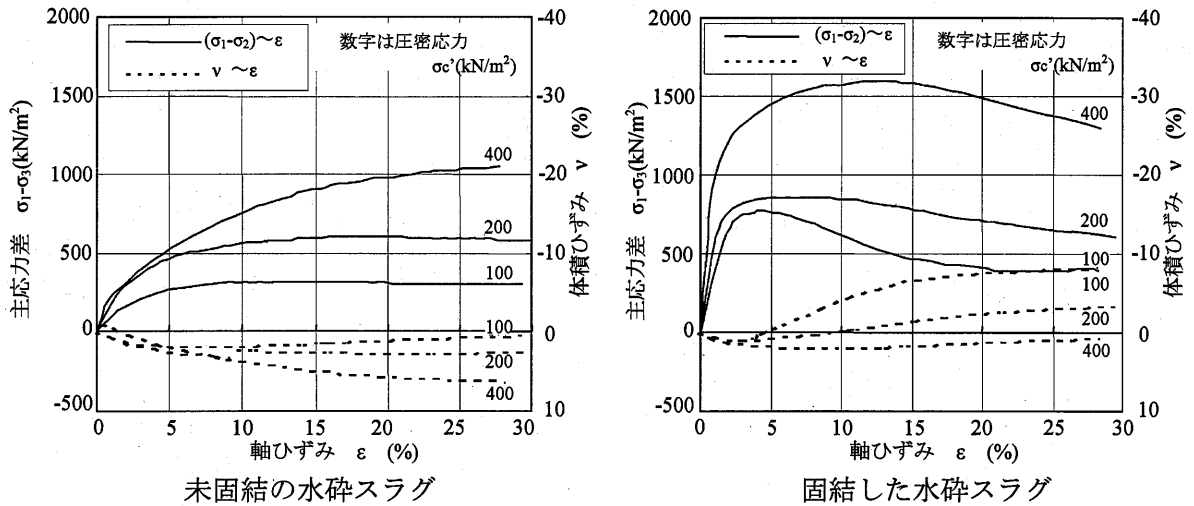


図 3.4.7 水砕スラグの排水三軸圧縮試験結果³¹⁾

(2) 固結による強度増加の扱い

水砕スラグのせん断抵抗角は、固結に伴い増加する。しかし、増加の程度が小さいことや、水砕スラグが一様に固結するまでには時間を要することから、固結によるせん断抵抗角の増加は考慮しないものとした。

ただし、水砕スラグの固結が確実に確保できる場合には、適切な粘着力を考慮してもよい。「利用マニュアル」では、固結した水砕スラグの最大強度は、せん断抵抗角による摩擦成分と固結による粘着成分を加えたものとしているが、考え方についての詳細は「利用マニュアル」を参考にすることができる。

3.4.3. 動的変形特性

水砕スラグの変形特性は、固結に伴い変化する。

【解説】

水砕スラグの変形特性は、未固結のものは天然砂とほぼ同等であるが、固結に伴いばらつきながら変化する。固結した水砕スラグのせん断剛性は天然砂より大きい。また減衰定数は、せん断ひずみ振幅 γ が 10^{-4} 以上ではばらつきが大きい、 10^{-4} 以下であれば天然砂とほぼ同等である。水砕スラグの変形特性に関する調査例は、「利用マニュアル」に示されているので、必要に応じて参照されたい。

3.4.4. 液状化特性

完全に固結した水砕スラグは液状化しない。

【解説】

既往の試験結果によると、水砕スラグに繰返し非排水三軸圧縮試験を行った場合、水砕スラグの一軸圧縮強さが $60\text{kN/m}^2 \sim 80\text{kN/m}^2$ 以上あれば、過剰間隙水圧は上昇するものの有効応力はゼロとはならず、供試体は液状化せずネッキング破壊を起こす。一方、完全に固結した水砕スラグの一軸圧縮強さは 100kN/m^2 以上の値を示すため、液状化しないとしている³²⁾。したがって、固結促進処理を行ったものや、施工後長期間経過したものなど、完全に固結した水砕スラグは液状化しないと考えてよい。

なお、水砕スラグの液状化特性についての詳細は、「利用マニュアル」に示されているので、必要に応じて参照されたい。

4. 使用上の留意点

4.1. 設計・施工時の留意点

4.1.1. 撒き出し

(1) 撒き出し厚

水砕スラグの撒き出し厚は、1.0m 以下とする。

(2) 撒き出し工法

水砕スラグは、「薄層撒き」以外にも「高撒き」や「厚撒き」などの撒き出し工法を用いることができる。

【解説】

(1) 撒き出し厚

水砕スラグは角張った形状に起因するインターロッキング効果や、含水比に影響されない締固め特性により、撒き出し厚を厚くすることができる。

水砕スラグを路床材として使用した盛土試験（路床厚 1.0m を一層で撒き出し、表面は 15t タイヤローラーで 12 回転圧）結果を図 4.1.1～図 4.1.4 に示す。ここでは、荷重は D 交通を想定し、輪荷重を 0.77t としたタイヤローラーを最大 5000 回走行させている。

図 4.1.1 は現場密度試験で求めた乾燥密度と走行回数との関係を示したものであるが、走行回数による密度変化は表層部を除いてほとんど見られない。図 4.1.2 は沈下量と走行回数との関係を示したものであるが、5,000 回の走行時で 15mm 程度の小さい値となっている。このように、水砕スラグを 1.0m 撒き出しで施工した場合、深さ毎の密度は均質ではないが、車両の走行による密度変化や圧密沈下が見られない。これらは、インターロッキング効果による荷重分散によるものと考えられる。

図 4.1.3 は平板載荷試験によって求めた K_{30} であるが、未走行条件下でも 30 日経過時点で $K_{30}=400\text{MN/m}^3$ 以上となっており、コンクリート舗装の路盤設計に使用する $K_{30}=200\text{MN/m}^3$ 以上³³⁾の値が得られている。図 4.1.4 はベンケルマンビーム試験によって求めた変形係数 E_s であるが、20 日経過時点で $E_s=200\text{MN/m}^2$ 以上、30 日経過後で $E_s=1,000\text{MN/m}^2$ 程度となっている。十分に締固めたマサ土の変形係数が $E_s=40\sim 60\text{MN/m}^2$ 程度であることから、水砕スラグを用いた路床は、1.0m 撒き出しで施工しても、路床として十分な強度を有しているといえる。

また、阪神大震災の復興工事において岸壁背後の裏込めに水砕スラグを用い、撒き出し厚 1.0m での施工が可能であるという報告もある³⁴⁾。これらより、水砕スラグは 1.0m の層厚で撒き出してよいものとした。ただし、撒き出し厚や工法などに関して管理基準が定められている場合には、それに従うものとする。

水砕スラグを用いて行われた盛土試験結果によると、現場密度試験による乾燥密度は、0.3m の撒き出し厚ではすべての箇所管理基準値（締固め度 90%以上）を満足した³⁵⁾。このように、水砕スラグは 0.3m の厚さで撒き出せば十分な締固め効果が得られる。したがって、

深さ方向に密度の均一性が必要な場合には、撒き出し厚を 30cm とすればよい。

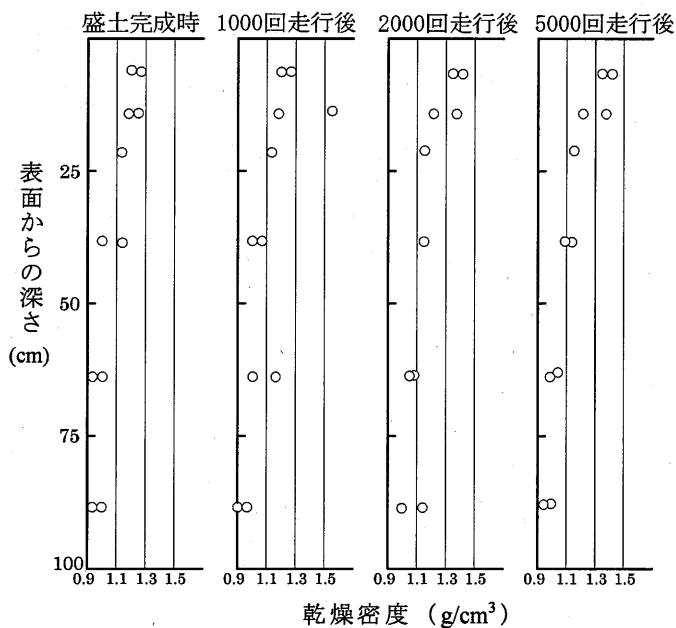


図 4.1.1 乾燥密度の変化

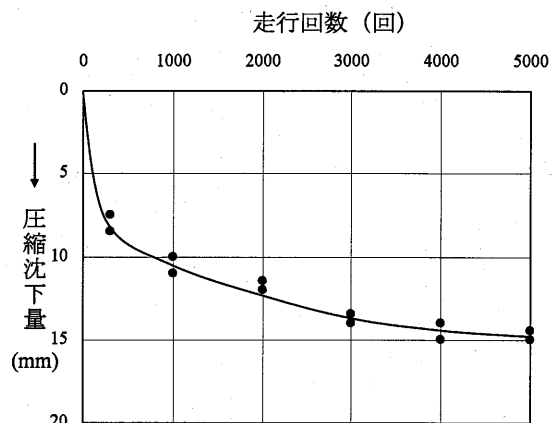


図 4.1.2 走行回数と圧縮沈下量

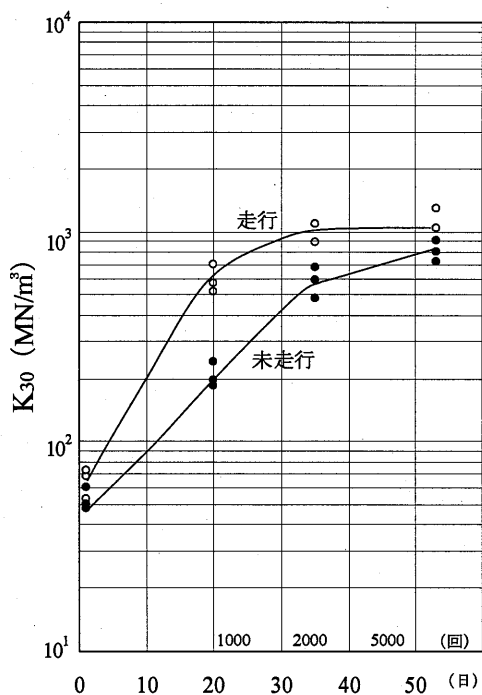


図 4.1.3 平板載荷試験による K_{30}

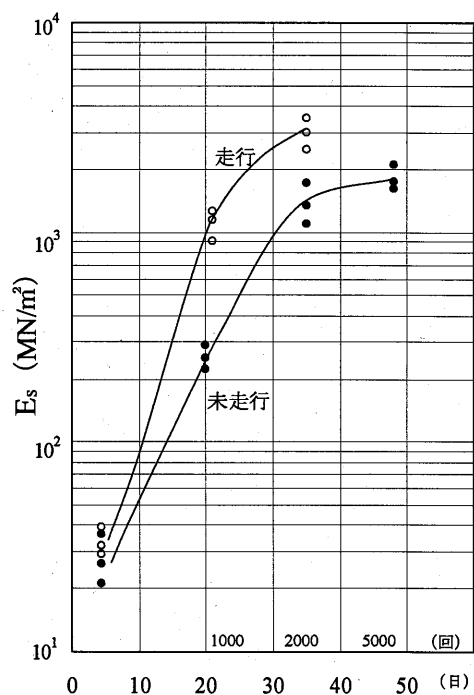


図 4.1.4 ベンケルマンビーム試験による E_s

(2) 撒き出し工法

水砕スラグは、その粒度や粒形から、撒き出し時に分離することがないため、天然材で用いられている薄層撒き以外にも、「高撒き」「厚撒き」(図 4.1.5 参照)の撒き出し工法を採用することができる。

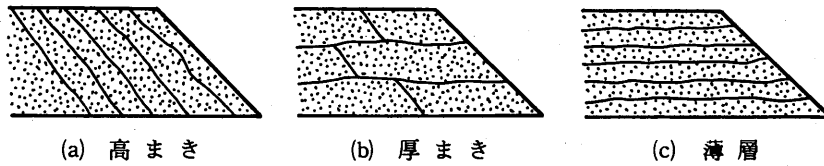


図 4.1.5 土の撒き出し工法

4.1.2. 水分管理

水砕スラグの撒き出し、および締固め時には、特別な水分管理を必要としない。

【解説】

「3.1.5 締固め特性」に示したように、水砕スラグの乾燥密度は、締固め時の含水比にほとんど影響されない。したがって、水砕スラグを盛土材料などとして使用する場合、撒き出し時や締固め時において、特別な水分管理(ばっ気乾燥や散水等)は必要としない。

4.1.3. 締固めによる密度の変化

水砕スラグの締固めによる密度の変化は、撒き出し厚に依存する。

【解説】

昭和58年に、西日本地区6製鉄所で製造された水砕スラグを用いて試験施工が実施され、締固め前後における密度の変化が測定された。表4.1.1および図4.1.6に試験概要を、図4.1.7に試験結果を示す。図4.1.7は締固め前後の密度変化(表4.1.1参照)を深さ方向にプロットしたものであるが、深いほど密度変化は小さい。このことから、締固めによる水砕スラグの密度変化は、撒き出し厚が大きいほど小さいと推定できる。

表 4.1.1 密度変化の測定試験概要

材料	土工用として出荷される標準的な物性の水砕スラグを使用
地盤	CBR \geq 10%程度の在来地盤上にて試験を実施した
撒き出し	11t級ブルドーザにて平均2回の走行で一層撒き出しとした
締固め機械	11t級ブルドーザおよびタイヤローラ
締固め回数	ブルドーザのみで行う場合は7回、ブルドーザとタイヤローラ併用の場合は、ブルドーザで2回締固めた後タイヤローラで5回締固めとした。また、適度の散水をしてよいものとした。
現場密度の測定	撒き出し終了後と締固め終了後に、JIS A1214「砂置換法による土の密度試験方法」によって測定した。
盛土厚	100cm よび 60cm
現場密度試験の測定位置	測定点は2点とし、図4.1.6の深度で測定した。
密度変化の計算方法	(施工後の乾燥密度/材料搬入時の乾燥密度-1) \times 100(%)として求めた。

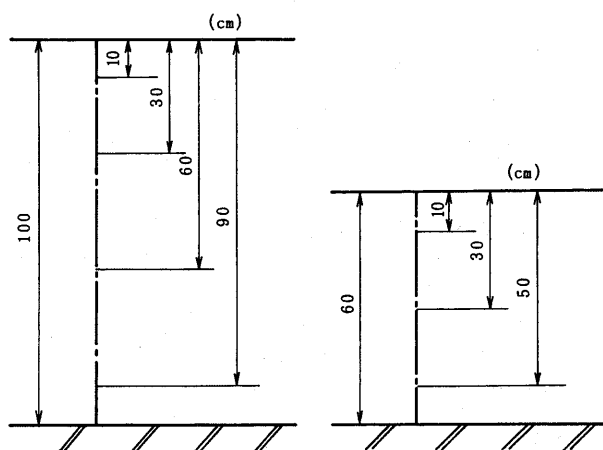


図 4.1.6 深さ方向の現場密度測定位置

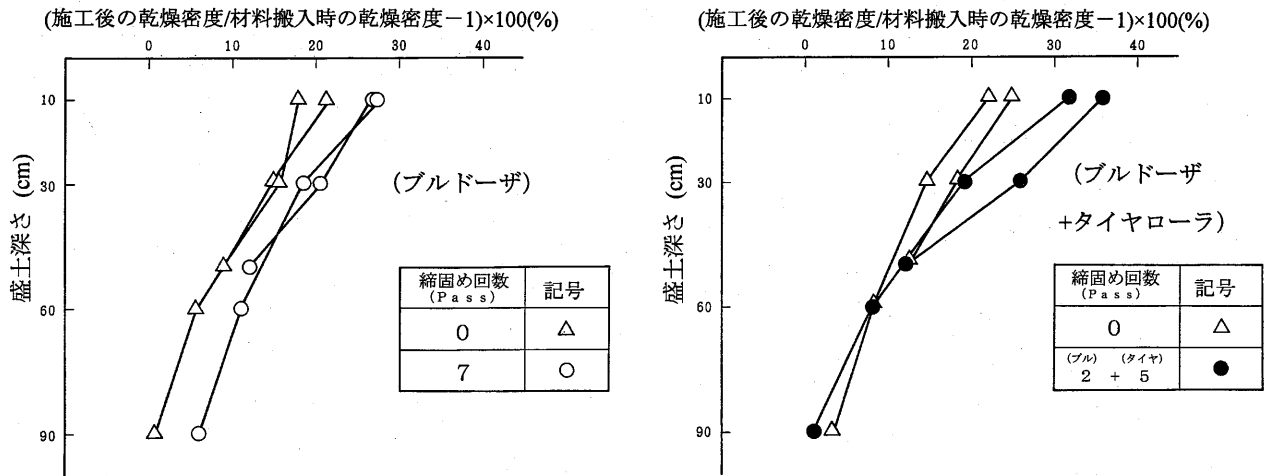


図 4.1.7 盛土深さと密度変化の関係

図 4.1.8 は、任意の撒き出し厚における密度変化を推定するための便宜的なグラフであり、図 4.1.7 の試験結果(締固め回数 7 回)をもとに、盛土深さ毎に密度変化の累計を平均したものである。

水砕スラグの使用にあたっては、この図をもとに概略の密度変化を推定することができる。例えば、撒き出し厚 30cm でブルドーザ締固めを行う場合の密度変化は 25%、撒き出し厚 60cm でブルドーザ+タイヤローラ締固めを行う場合の密度変化は 23%と推定できる。

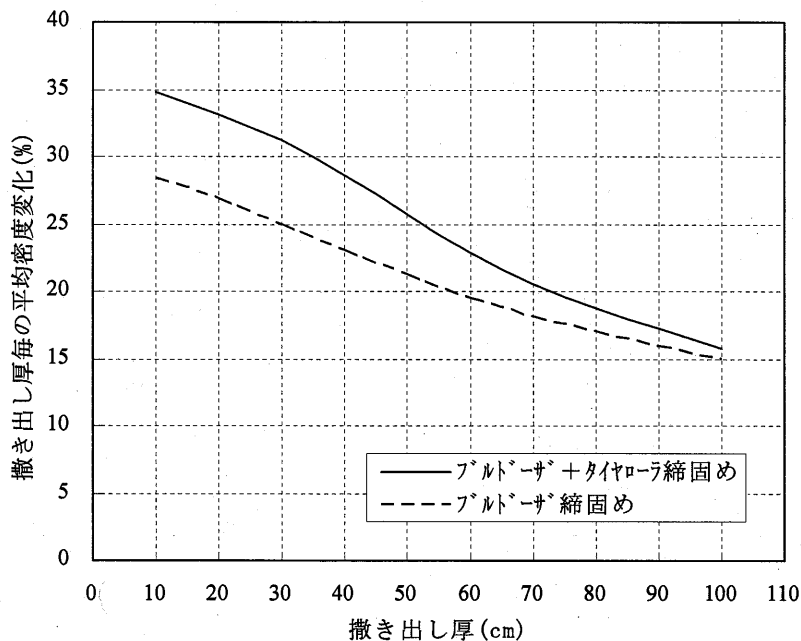


図 4.1.8 任意の撒き出し厚における密度変化の推定

4.1.4. 法面

水砕スラグを用いた盛土の法面は、1:1.5以下の勾配で安定する。ただし、法面勾配の決定にあたっては、安定性、経済性、施工性などを十分検討して決定しなければならない。

【解説】

水砕スラグは良好なせん断強度特性および水硬性を有しているため、盛土材料として用いた場合、天然材を用いた場合よりも法面勾配を急にすることができる。表 4.1.2 は、水砕スラグを用いた盛土高 2m の試験盛土の結果であるが、法面は、1:1.0 や 1:0.5 などの急な勾配では安定せず 1:1.5 程度の勾配に落ち着き、その後は 2 年経過しても安定していた³⁶⁾。

しかし、法面勾配を 1:1.5 とした場合には、振動ローラやブルドーザなどによる通常の方法では締固めが困難(勾配が 1:1.8 程度までであれば可能)なため、特殊な締固め機械を使用するか、余盛りを行った後掘削・整形するなどの方法が必要となる。したがって、盛土の法面勾配は、施工性なども踏まえ総合的に判断して決定しなければならない。

また、著しく高い盛土の場合には、試験盛土によって最急勾配を確認するか、天然材と同じ扱いとして勾配を決定することができる。

表 4.1.2 試験盛土による法面勾配³⁶⁾

計画法面勾配	施工後法面勾配
1:2.0	1:2.0
1:1.8	1:1.8
1:1.0	1:1.4
1:0.5	1:1.5

マサ土や山砂などの天然材を用いた盛土では、雨水による浸食や凍上による表層の崩落などにより法面が損傷することがある。そのため、法面には植生やブロック張りなどの防護工を行う場合が多い。それに対し水砕スラグは良好なせん断強度特性や水硬性を有するため、盛土材として利用した場合、安定した法面を形成する。また、水砕スラグは透水性が良いため、降雨時に表面水を吸収、排水することにより、表面水の流下による浸食を低減する。

河野らは、水砕スラグおよびマサ土を用いた盛土の法面に 250mm/hr の散水を行い、マサ土の盛土では法面崩壊が見られるのに対し、水砕スラグの盛土では水が法面を流下せずに盛土内に吸い込まれて崩壊が見られないことや、水砕スラグを主材料とした透水性硬化体を法面に設置すると、法面崩壊を誘引する洗掘や土粒子の乱れの恐れが減少する^{37),38),39)}ことを報告している。また、水砕スラグを用いて造成された盛土では、施工 2 年後において、幅 15cm、深さ 5cm 程度の雨水による浸食が見られたものの、特に目立った浸食もなく安定

していた⁴⁰⁾。

このように、水砕スラグを用いた盛土は、締固めを十分に行うならば安定した法面を形成するため、法面保護は特に必要としない。

4.1.5. 砂杭として用いる場合

(1) 圧密促進効果の低下

水砕スラグをサンドドレーンやサンドコンパクションパイルなどの砂杭として用いる場合、固結による応力集中や透水性の低下が生じる可能性があるため、注意を要する。

(2) 低置換率サンドコンパクションパイル工法での留意点

水砕スラグを低置換率のサンドコンパクションパイルに用いる場合、固結に伴い砂杭が剛体として挙動する可能性があるため、注意を要する。

【解説】

(1) 圧密促進効果の低下

「3.1.4 透水性」で示したように、既往の事例では、水砕スラグをサンドコンパクションパイルに用いた場合、締固め時の粒子破碎の影響などにより固結が促進され、施工後 6 ヶ月で透水係数は $k=10^{-6}\sim 10^{-7}\text{cm/s}$ 程度にまで低下した⁴¹⁾。また、固結に伴いパイルの剛性が高くなるため、パイルへの応力集中が発生する可能性がある。したがって、水砕スラグをサンドコンパクションパイルに用いる場合、圧密促進効果が低下する可能性がある。

水砕スラグをサンドドレーンに用いる場合には、締固めを伴わないためサンドコンパクションパイルに用いる場合ほど固結は促進されない。しかし、サンドドレーンに水砕スラグを用いた既往の事例では、施工後 17 ヶ月で透水係数は $k=2\times 10^{-3}\sim 1\times 10^{-4}\text{cm/s}$ 程度にまで低下した⁴²⁾ことが報告されている。また、固結に伴い、通常は設計上考慮しないドレーンへの応力集中が発生する可能性がある。したがって、水砕スラグをサンドドレーンに使用する場合には、短期間で圧密を完了させるよう計画するのがよい。

(2) 低置換率サンドコンパクションパイル工法での留意点

固結した水砕スラグの剛性は、周辺地盤の剛性と比べて極めて高い。そのため、水砕スラグを用いたサンドコンパクションパイルが固結した場合、天然材を用いた場合のように地盤に追随して挙動せず、地盤内で剛体として挙動することが考えられる。

一般に、偏荷重が作用するような箇所で低置換率のサンドコンパクションパイルを打設する場合は、円形すべり計算によって安定性を照査する場合が多い。しかし、材料として用いた水砕スラグが固結した場合、円形すべり計算において前提としている破壊モードとは異なるモードで挙動する可能性がある。

このようなことから、水砕スラグを低置換率のサンドコンパクションパイルに用いる場合には、偏荷重の作用しない箇所に用いるか、FEM 解析などにより水砕スラグが固結した

場合の挙動を確認した上で用いるものとする。なお、高置換のサンドコンパクションパイプに水砕スラグを利用する場合には、「利用マニュアル」を参考にすることができる。

4.1.6. 各種用途に対する適用性

水砕スラグは、その特性を利用し、様々な用途に使用することができる。

【解説】

水砕スラグは、様々な用途に使用することができる。水砕スラグの特性を利用した用途を表 4.1.3 に示す。

表 4.1.3 水砕スラグの用途

分類	用途	特性		
		軽量である	せん断抵抗角が大きい	水硬性を有する
土工	軽量盛土	○		
	構造物の埋め戻し	○	○	○
	法面保護		○	○
	擁壁などの裏込め	○	○	○
地盤改良	サンドコンパクションパイプ		○	○
	軟弱地盤の覆土	○	○	○
道路	路盤		○	○
	路床, 遮断層		○	○

4.1.7. 水砕スラグの固結

水砕スラグは経時的に固結することを踏まえて使用する。

【解説】

水砕スラグを使用した地盤で掘削、杭の打設、バーチカルドレーンやサンドコンパクションパイプの打設などを行う場合、水砕スラグの固結に伴い作業効率が低下することがある。したがって、このような場合には事前調査によって水砕スラグの固結状況を確認し、必要に応じて補助工法などの対策を施すことが望ましい。

また、大規模工事などで水砕スラグを一度に大量に搬入し野外で長期間保管しておく、使用前に固結する可能性があるため、現場での使用計画を踏まえ適切な量を順次搬入して使用することが望ましい。

4.2. 環境に関する留意点

水砕スラグからの有害物質の溶出は環境基準に定められている基準値以下である。しかし、水砕スラグの透過水や表流水は高 pH となるため、使用にあたっては、周辺域への影響などに十分配慮する。

【解説】

水砕スラグの使用にあたっては、大気汚染防止法(平成 18 年法律第 5 号)、水質汚濁防止法(平成 18 年法律第 68 号)、海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律(平成 19 年法律第 62 号)等、各基準ならびに周囲の条件に充分留意し、保管時および施工時を含め、周辺環境に影響を与えないよう適切に扱わなければならない。水砕スラグの使用にあたっては、鉄鋼スラグ協会から刊行されている「鉄鋼スラグ製品の管理に関するガイドライン」⁴³⁾を参考にすることができる。

水砕スラグからの有害物質の溶出および含有量は環境基準に定められている基準値以下であるが、「3.2.2 溶出」で示したように、水砕スラグを用いて造成した地盤の間隙水は pH = 10~12 の高 pH 状態になることがある。しかし、周辺域での pH は、土壤による吸着・中和作用や地下水による希釈により低減される。土壤のアルカリ吸着能力は土の種類によって異なり、ローム、粘性土、有機質土等はアルカリ吸着能力が高いが、礫、砂、シラス、火山灰等はアルカリ吸着能力が低い⁴⁴⁾。したがって、水砕スラグが地下水位以下に位置し、周辺土のアルカリ吸着能力が低い場合には、止水工やアルカリ吸着層の設置等、地下水に高 pH 水が混入しないよう対策を施す必要がある。なお、「建設汚泥リサイクル指針」⁴⁵⁾では、改良土を盛土や埋戻しに利用する場合のアルカリ吸着層の標準厚さとして、粘性土や有機質土などでは 30cm、シルトでは 50cm が示されており、水砕スラグの場合もこれを参考にすることができる。

また、水砕スラグの保管場所から高 pH の表流水が周辺域へ流出したり、水砕スラグ地盤内に設置した排水管の継目から高 pH 水が管内に流入して外部に排出されるなど、水砕スラグから流出した高 pH 水の周辺域への影響が懸念される場合には、モニタリング調査や対策を講じる必要がある。

4.3. 植物への影響

(1) 植生用土壌としての適用性

水砕スラグは、植生用土壌として必要な条件を満たしておらず、水砕スラグ単体では植物は生育しないため、植物が生育するためには適度な客土が必要である。

(2) 肥料および土壌改良材としての適用性

水砕スラグは、肥料および土壌改良材として使用できる。

【解説】

(1) 植生用土壌としての適用性

植物体に含まれる元素は 30 種以上におよぶが、その中で植物の生育に必要な元素は表 4.3.1 に示すように、現在では 16 種とされている。この 16 種はあらゆる植物に共通な不可欠栄養分であって、特殊な植物のためのものは含まれていない。

表 4.3.1 に示すように、水、酸素、炭素の 3 成分は他の成分と比べ桁違いに必要な量が多いが、これらの元素は空気、水によって無限に供給されるので、栄養分として特に添加する必要はない。したがって植物の栄養分として問題になるのはそれ以下の元素で、特に窒素、リン、カリウムは必要量が多く肥料の第 1 要素と呼ばれ区別されている。

次に必要量が多い元素は、カルシウム、マグネシウム、ケイ素、硫黄であり、肥料の第 2 要素と呼ばれている。これら 4 元素は土壌中に含まれているが、可給体のものは比較的水による流出が多く、欠乏しやすい元素であるため、肥料として添加する必要がある。その他の元素は微量元素と呼ばれており、土壌中に含まれる程度の量で一般的に十分であり、特に肥料として添加する必要はない場合が多い。

水砕スラグに含まれる元素は肥料の第 2 要素と微量元素であり、第 1 要素はほとんど含まれていない。したがって土壌に欠乏しやすい第 2 要素と微量元素を補給するための土壌改良材としては非常に有効であるが、植生用土壌とはなり得ない。たとえ窒素、リン、カリウム等の成分が必要量満たされても、水砕スラグはカルシウム分が高いので、アルカリ土類金属過剰障害をひき起こす恐れがある。また、水砕スラグは保水性が悪く、植生用土壌として用いても植物の生育に必要な水分を供給できない。このように、水砕スラグ単体では、植物の生育に必要な土壌としての条件を満足していないので、植物が生育するためには適度な客土が必要である。

(2) 肥料および土壌改良材としての適用性

高炉スラグに含有される可溶性珪酸は、平均的に 30%前後である。珪酸は、一般的にはまだ植物の必須成分として認められてはいないが、稲作中心の農業には不可欠な必須成分として位置づけられている。また、昭和 52 年より日本土壌協会を中心として数多くの試験が行われ、適量使用によって植物の生育に効果のあることが報告されている。なお、水砕スラグは肥料及び土壌改良材として使用されてきた長い歴史があり、平成 18 年度には 17 万 4,000 トンの水砕スラグが肥料及び土壌改良材として使用されている。

表 4.3.1 植物の生育に必要な栄養分⁴⁶⁾

栄 養 分	必 要 量*	スラグ中 成分	主 な 供 給 源
水 素 (H ₂)	H ₂ O として 7,350,000		水
酸 素 (O ₂)	10,000		空気中の酸素ガス
炭 素 (C)	CO ₂ として 28,500		空気中の炭酸ガス
窒 素 (N)	310		窒素肥料 } リン酸肥料 } 第 1 要素肥料 カリ肥料 }
リ ン (P)	120		
カ リ ウ ム (K)	245		
カ ル シ ウ ム (Ca)	58	○	石灰肥料 } 苦土肥料 } 第 2 要素肥料 珪酸肥料 }
マ グ ネ シ ウ ム (Mg)	33	○	
珪 素 (Si)	50	○	
硫 黄 (S)	50	○	} 微量要素肥料
鉄 (Fe)	3	○	
マ ン ガ ン (Mn)	0.45	○	
ホ ウ 素 (B)	0.10	○	
亜 鉛 (Zn)	trace	○	
銅 (Cu)	trace		
モ リ ブ デ ン (Mo)	trace		
<p>※アメリカ農務省の調査結果で、穀類の収穫に必要な量 (kg/ヘクタール) を示す。 上記 16 成分の他に太陽エネルギー温度が必要なことは勿論、腐植などの有機物も必要である。</p>			

4.4. 鋼材の腐食

水砕スラグで造成した地盤での鋼材の腐食速度は、一般土壌と同等である。

【解説】

地盤内の鋼材の腐食には、通気性、電気伝導度、復極剤、インヒビターとして働く溶解塩、湿分、pH、土壌粒度の不均一さ等様々な要因があるため、鋼材の腐食環境は場所によって大きく異なる。そのため、地盤内の鋼材の腐食については明確な理論が得られていない。しかし、例えば米国では、パイプの埋設に水砕スラグを用いると周囲が弱アルカリ性に保たれてパイプの酸による腐食が防止できるといわれており、上下水道及び石油、ガスのパイプラインの埋戻し材として水砕スラグが用いられている。このようなことから、酸性土壌の多い我が国においては埋設管埋戻し等に特に有用であると考えられる。

表 4.4.1 および表 4.4.2 は、C.I.P.R.A(Cast Iron Pipe Research Association)にて定められた鑄鉄管埋設における勧告基準をもとに防食性評価試験を行った結果である。この勧告基準は、土壌の腐食性を評価するもので、評価基準が 10 点以上になると特殊防食法を採用することを勧告するものである。試験結果では 6.5 点となり、特殊防食の必要のない土壌と判定された。

図 4.4.1 は、埋設試験での 1 年間のパイプ腐食試験の結果であるが、水砕スラグ中と山土中のパイプの腐食量は同程度であり、0.04mm/年以下である。

表 4.4.1 防食性評価試験結果

試験項目	試験結果	評価基準	
土壌の比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	自然状態 26,000 ($\omega=11\%$) 飽和状態 2,000 ($\omega=36\%$)	< 700	10 点
		700~1,000	8
		1,000~1,200	5
		1,200~1,500	2
		1,500~2,000	1
	>2,000	0	
pH	9.9	0~2	5
		2~4	3
		4~8.5	0
		>8.5	3
Redox 単位 (mV)	飽和状態 497 ($\omega=36\%$)	>100	0
		50~100	3.5
		0~50	4
		(-)	5
水分	含水量 11% 透水係数 $2.70 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$	排水悪く常に湿潤	2
		排水かなり良一般に湿っている	1
		排水良好一般的に乾燥	0
硫化物	(+)	(+)	3.5
		Trace (検出)	2
		Negative (不検出)	0
合計		6.5 点	

表 4.4.2 防食性評価試験方法

土壌の比抵抗	電極を埋設深度まで水砕スラグにさし込み，交流発信器にて発信音の最低になるようにコールラウシュブリッジのダイヤルを調整し，その位置における比抵抗を読みとる。
pH	水砕スラグ 1:蒸留水 2.5 の割合で抽出した上澄液についてガラス電極式メーターで測定する。
Redox 電位	Redox 電位計を水砕スラグ中に挿入して電位差を測定する。
硫化物	0.1N ヨウ素溶液中に 3%ナトリウムナジド溶液を入れ，これを水砕スラグの入った試験器中に注入する。硫黄物が存在すると窒素ガスが発生し硫化物の存在が検知される。
水分	含水量及び透水係数を JISA 1203, 及び JISA 1218 により測定する。

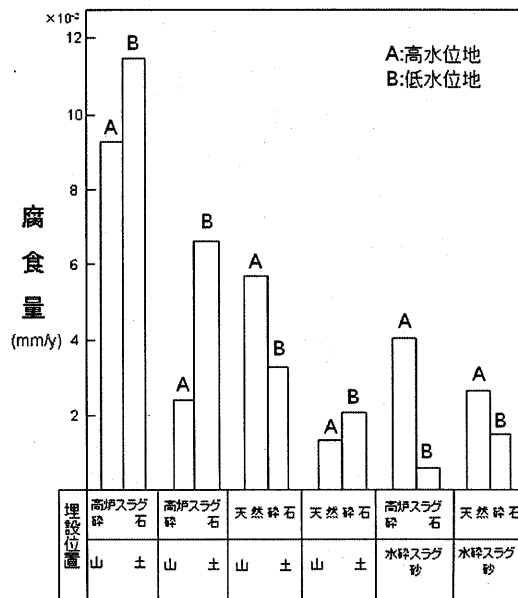
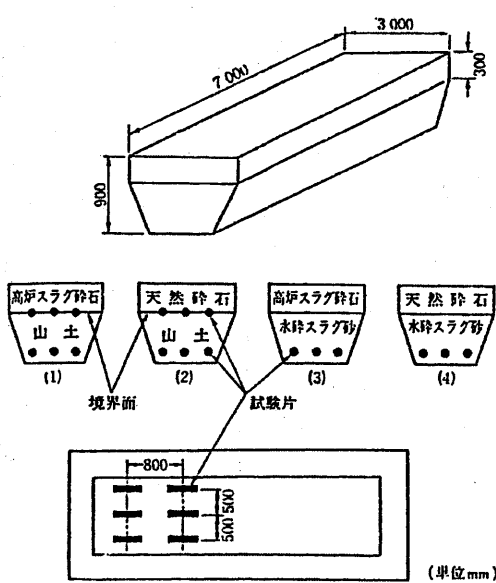


図 4.4.1 パイプ腐食測定結果⁴⁷⁾

4.5. 凍上

水砕スラグで造成した地盤では、凍上は生じない。

【解説】

土の凍上の生じやすさは、土の細粒分含有率に大きく影響される。一般に、不均質な土では0.02mm以下の細粒分を3%以上、均質な土では10%以上含む場合に凍上が生じ、1%以下の場合には地下水位が凍結深さにあっても凍上は生じないとされている。

水砕スラグは0.075mm以下の微粒子が0.5~0.6%しか含まれず、凍上現象は生じない。表4.5.1は、凍上試験結果例であるが、マサ土や黒ボクでは凍上が生じているのに対し、水砕スラグでは凍上は生じていない。したがって、寒冷地で水砕スラグを路床に使用した場合でも、遮断層の必要はない。

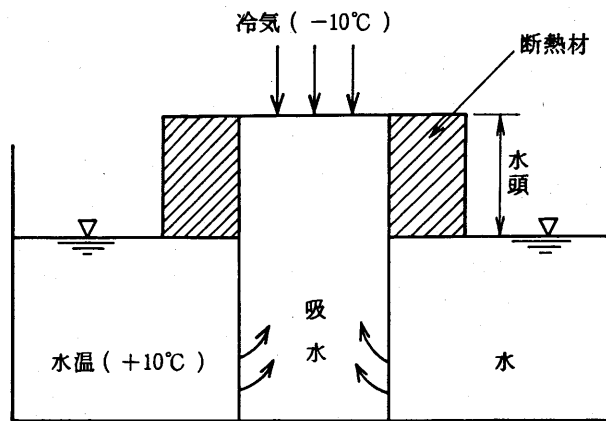


図 4.5.1 凍上試験方法

表 4.5.1 凍上試験結果例

材 料	セメント量 (%)	材 令 (日)	水 道	気 温	水頭 (cm)	観 察 時 間	観 察 結 果
水砕スラグ	4	1	+10°C	-10°C	7	96 時間	約 3cm 凍結, 凍上はなし
	4	1			2		約 1cm 凍結, 凍上はなし
	0	0			5		約 4cm 凍結, 凍上はなし
マ サ 土	0	0			7		上面から 0.5 および 1 cm の位置に 2~3cm の凍上を観察
黒 ボ ク	0	0			7		上面より 2mm の位置に 5.3cm の凍上を観察

5. 設計例

5.1. 裏込め

水砕スラグはせん断抵抗角が大きく軽量であるため、裏込め材として用いた場合には土圧が軽減され、土留め構造の断面を縮小できるという利点がある。以下に示すのは、コンクリート擁壁の裏込めに水砕スラグを用いた場合の設計例である。なお、以下の設計例では固結による水砕スラグの強度増加は見込んでいないが、実際に使用した場合には固結に伴い土圧がさらに軽減され、経時的に安定性が増加する。

(1) 設計条件

・検討モデル

下図に示すL型擁壁の裏込めに水砕スラグを用いた場合の設計を行う。

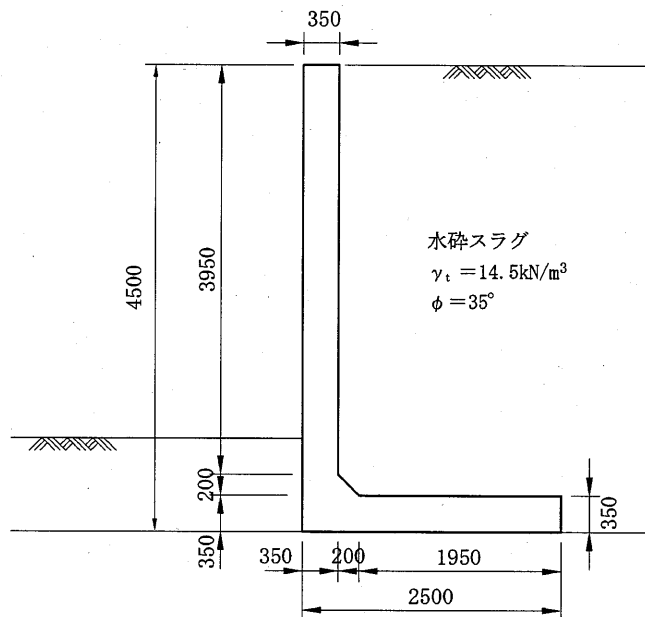


図 5.1.1 検討断面図

・単位体積重量

水砕スラグ $\gamma_t = 14.5 \text{ kN/m}^3$

鉄筋コンクリート $\gamma = 24.0 \text{ kN/m}^3$

・せん断抵抗角

水砕スラグ $\phi = 35^\circ$

・基礎地盤の諸元

摩擦係数 $\mu = 0.6$

土の粘着力 $c = 0 \text{ kN/m}^2$

地盤の許容支持力

$$q_a = 200 \text{ kN/m}^2$$

・安定条件

滑動 : $F_s = 1.50$

転倒 : $e(\text{偏心距離}) \leq B(\text{底版幅})/6$

支持 : 最大地盤反力 $\leq q_a$

・許容応力度

コンクリート

設計基準強度

$$\sigma_{ck} = 24 \text{ N/mm}^2$$

許容曲げ圧縮応力度

$$\sigma_{ca} = 9 \text{ N/mm}^2$$

許容せん断応力度

$$\tau_{ca} = 0.45 \text{ N/mm}^2$$

鉄筋 (異形棒鋼)

許容引張応力度(SD295)

$$\sigma_{sa} = 180 \text{ N/mm}^2$$

・適用基準

道路土工 擁壁工指針 (社) 日本道路協会 平成 11 年

(2) 壁体重量

壁体重量は、以下のとおりとなる。

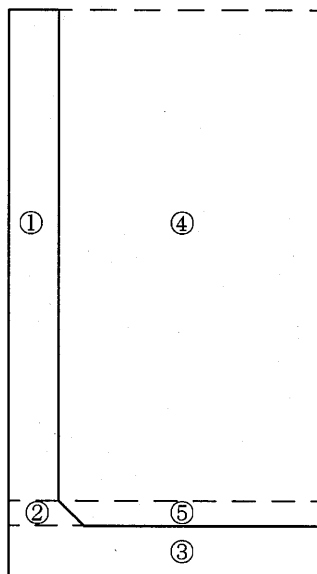


図 5.1.2 重量算定区分図

表 5.1.1 壁体重量

区分	要素の面積A (m ²)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	鉛直力 V(kN)	アーム X(m)	モーメント V・X(kN・m)
①	0.35×3.95 = 1.383	24.0	33.192	0.175	5.809
②	(0.35+0.55)×0.2/2 = 0.090	24.0	2.160	0.229	0.495
③	0.35×2.5 = 0.876	24.0	21.024	1.250	26.280
④	2.15×3.95 = 8.493	14.5	123.149	1.425	175.487
⑤	(2.15+1.95)×0.2/2 = 0.410	14.5	5.945	1.474	8.763
合計			185.470		216.834

(3) 土圧

土圧は、試行くさび法により求める。計算式を以下に示す。

$$\text{土圧力} : P_a = \frac{W_a \cdot \sin(\alpha_a - \phi)}{\cos(\alpha_a - \phi - \delta_a - j_a)}$$

$$\text{土圧係数} : K_a = \frac{2 \cdot P_a}{\gamma_s \cdot h_a^2}$$

- γ_s : 裏込め土の単位体積重量 (kN/m³)
- h_a : 土圧作用面の高さ (m)
- W_a : 仮想背面とすべり面との間の土くさびの重量 (kN/m)
- φ : 裏込め土の内部摩擦角 (°)
- δ_a : 壁面摩擦角 (°)
- j_a : 擁壁背面の傾斜角 (°)
- α_a : すべり角 (°)
- K_a : 主働土圧係数
- P_a : 土圧力 (kN/m)
- P_{ah} : 土圧力の水平成分 (kN/m)
- P_{av} : 土圧力の鉛直成分 (kN/m)

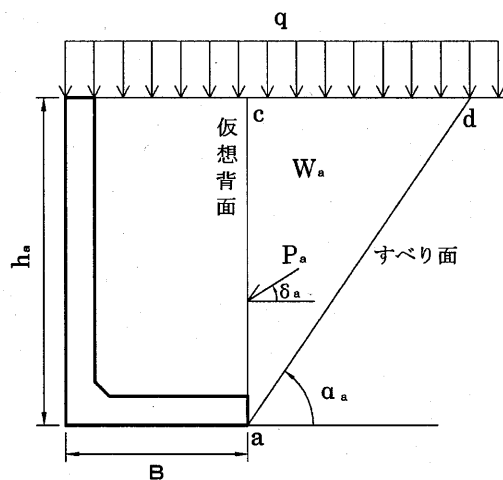


図 5.1.3 試行くさび法

$$\begin{aligned}
h_a &= 4.500 \quad \text{m} \\
B &= 2.500 \quad \text{m} \\
q &= 0 \quad \text{kN/m}^2 \\
\delta_a &= 0 \quad \circ \\
j_a &= 0 \quad \circ \\
\alpha_a &= 62.5 \quad \circ \\
W_a &= \text{a b c で囲まれる土くさびの重量} \\
&= 76.426 \quad \text{kN/m} \\
P_a &= \frac{W_a \cdot \sin(\alpha_a - \phi)}{\cos(\alpha_a - \phi - \delta_a - j_a)} \\
&= 39.785 \quad \text{kN/m} \\
P_{ah} &= P_a \cdot \cos(\delta_a + j_a) \\
&= 39.785 \quad \text{kN/m} \\
P_{av} &= P_a \cdot \sin(\delta_a + j_a) \\
&= 0 \quad \text{kN/m} \\
K_a &= \frac{2 \cdot P_a}{\gamma_s \cdot h_a^2} \\
&= 0.271
\end{aligned}$$

(4) 安定計算

安定計算の結果を表 5.1.2 に示す。

表 5.1.2 擁壁安定計算結果

	鉛直力 V (kN/m)	水平力 H (kN/m)	原点 O からの距離		X, Y モーメント	
			X 方向 (m)	Y 方向 (m)	X 方向 (kN・m/m)	Y 方向 (kN・m/m)
自重	185.470	—	1.169	—	216.834	—
土圧	—	39.785	—	1.500	—	59.678
合計	185.470	39.785			216.834	59.678

$$\text{作用距離} \quad d = \frac{216.834 - 59.678}{185.470} = 0.847\text{m}$$

$$\text{偏心距離} \quad e = \frac{B}{2} - d = 0.403\text{m}$$

- 転倒に対する検討

偏心距離 $e = 0.403\text{m} \leq \frac{B}{6} = 0.417\text{m}$ O. K.

- 滑動に対する検討

滑動の安全率 $F_s = \frac{(V_i + P_{av} + V_q) \cdot \mu + C \cdot B}{P_{ah}}$
 $= 2.797 \geq 1.50$ O. K.

- 地盤の支持に対する検討

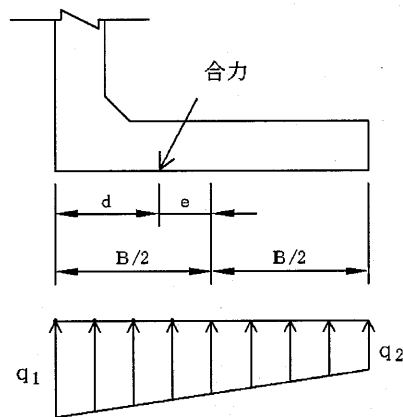


図 5.1.4 地盤反力

最大地盤反力 $q_1 = \frac{(V_i + P_{av} + V_q)}{B} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot e}{B}\right) = 145.9\text{kN/m}^2 \leq q_a = 200\text{kN/m}^2$

最小地盤反力 $q_2 = \frac{(V_i + P_{av} + V_q)}{B} \cdot \left(1 - \frac{6 \cdot e}{B}\right) = 2.4\text{kN/m}^2 \leq q_a = 200\text{kN/m}^2$

. O. K.

(5) 裏込めを砂とした場合との比較

裏込め材に砂 ($\phi=30^\circ$, $\gamma_t=18.0\text{kN/m}^3$) を使用した場合との比較を表 5.1.3 に示す. 裏込め材に水砕スラグを使用することにより, 砂を使用した場合よりコンクリート量や鉄筋量が低減されている.

表 5.1.3 裏込め材に水砕スラグを用いた場合と砂を用いた場合との比較

裏込め材		水 砕 ス ラ グ $\phi=35^\circ, \gamma_t=14.5\text{kN/m}^3$	砂 $\phi=30^\circ, \gamma_t=18.0\text{kN/m}^3$	備 考
擁 壁 幅		2.50m	2.70m	
安定計算	転 倒	$0.403\text{m} \leq 0.417\text{m}$	$0.435\text{m} \leq 0.450\text{m}$	$e \leq B/6$
	滑 動	$F_s=2.797 \geq 1.5$	$F_s=2.304 \geq 1.5$	
	支持力	$145.9\text{kN/m}^2 \leq 200\text{kN/m}^2$	$169.9\text{kN/m}^2 \leq 200\text{kN/m}^2$	
使 用 鉄 筋*		D16 @250 (42.4kg/m)	D19 @200 (78.8kg/m)	かぶり 50mm
コンクリート量		2.35 m ³ /m	2.42 m ³ /m	

※鉄筋重量は延長 1m 当りの主筋の重量

5.2. 路床

水砕スラグは、撒き出し厚 1m 程度で締固めても 20%以上の CBR が得られるため、水砕スラグを路床材として用いた場合、経済的な舗装設計が可能となる。また施工時には、水砕スラグの締固め度は含水比に依存しないため、締固め時の含水比管理が容易である。以下に示すのは、水砕スラグを路床材として用いた場合の舗装の設計例である。なお、以下の設計例では水砕スラグの固結を考慮していないが、水砕スラグを用いた路床の CBR は固結に伴い増加するため、路床の安定性は経時的に増加する。

(1) 設計条件

- ・ 計画交通量 : 3,000 台/日
- ・ 疲労破壊輪数 : 35,000,000 回/10 年
- ・ 設計 CBR : 水砕スラグ 20%, 天然砂 10%, 在来地盤 3%
- ・ 路床厚 : 1.0m
- ・ 表層と基層を加えた最小厚さ : 20cm (計画交通量 $T \geq 3,000$ 台/日)
- ・ 路盤の最小厚さ : 最大粒径の 3 倍かつ 10cm
- ・ 適用基準

舗装の構造に関する技術基準・同解説 (社)日本道路協会 平成 13 年

(2) 必要等値換算厚

必要等値換算厚は、次式によって求める。

$$T_A = 3.84N^{0.16}/\text{CBR}^{0.3}$$

T_A : 必要等値換算厚(cm)

N : 疲労破壊輪数(回/10 年)

CBR : 設計 CBR (%)

それぞれの路床材を用いた場合の必要等値換算厚を表 5.2.1 に示す。

表 5.2.1 路床材毎の必要等値換算係数

路床材	N (回/10年)	CBR (%)	T_A (cm)
水砕スラグ	35,000,000	20	25.2
天然砂	35,000,000	10	31.0
原地盤	35,000,000	3	44.5

(3) 舗装構造

路盤材として水硬性粒度調整鉄鋼スラグ (修正 CBR80%以上) およびクラッシャースラグ (修正 CBR30%以上) を用いるものとし, 必要等値換算厚を満たすように設計した舗装構造を以下に示す. 路床に水砕スラグを用いた場合, 天然砂を用いた場合よりも舗装厚を 10cm 薄くすることができる.

表 5.2.2 路床に水砕スラグを用いた場合の舗装構造

舗装材	厚さ (cm)	等値換算係数	等値換算厚 (cm)
加熱アスファルト混合物	20	1.00	20.0
水硬性粒度調整鉄鋼スラグ (修正 CBR80 以上)	10	0.55	5.5
クラッシャースラグ (修正 CBR30 以上)	10	0.25	2.5
合計	40		28.0

表 5.2.3 路床材に天然砂を用いた場合の舗装構造

舗装材	厚さ (cm)	等値換算係数	等値換算厚 (cm)
加熱アスファルト混合物	20	1.00	20.0
水硬性粒度調整鉄鋼スラグ (修正 CBR80 以上)	15	0.55	8.3
クラッシャースラグ (修正 CBR30 以上)	15	0.25	3.8
合計	50		32.1

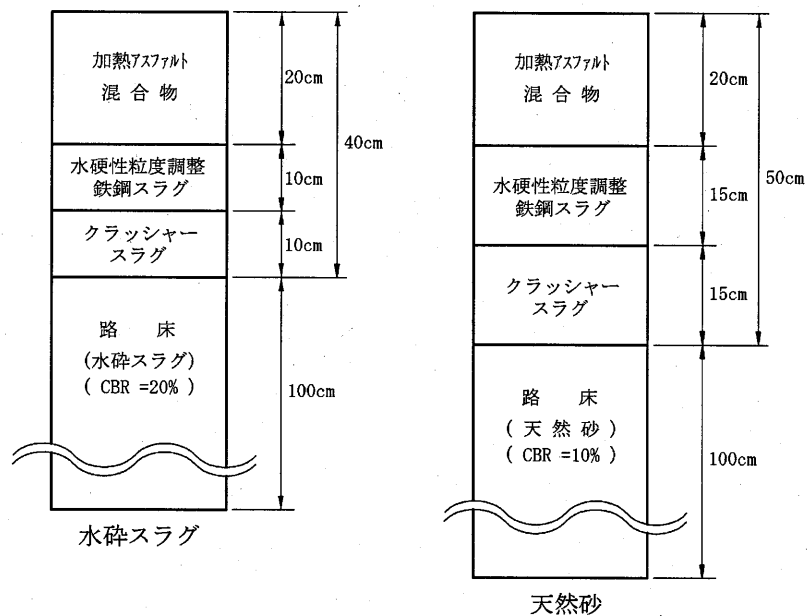


図 5.2.1 舗装断面

5.3. 置換

水砕スラグはせん断抵抗角が大きいので、軟弱地盤の置換材として用いた場合には、良質な地盤を形成できる。以下に、構造物直下の軟弱地盤を置換した場合の設計例を示す。なお、以下の設計例では水砕スラグの固結を考慮していないが、水砕スラグのせん断抵抗は固結に伴い増加するため、水砕スラグを用いた地盤の支持力は経時的に増加する。

(1) 設計条件

- ・ 検討断面

検討断面は、以下のとおりとする。

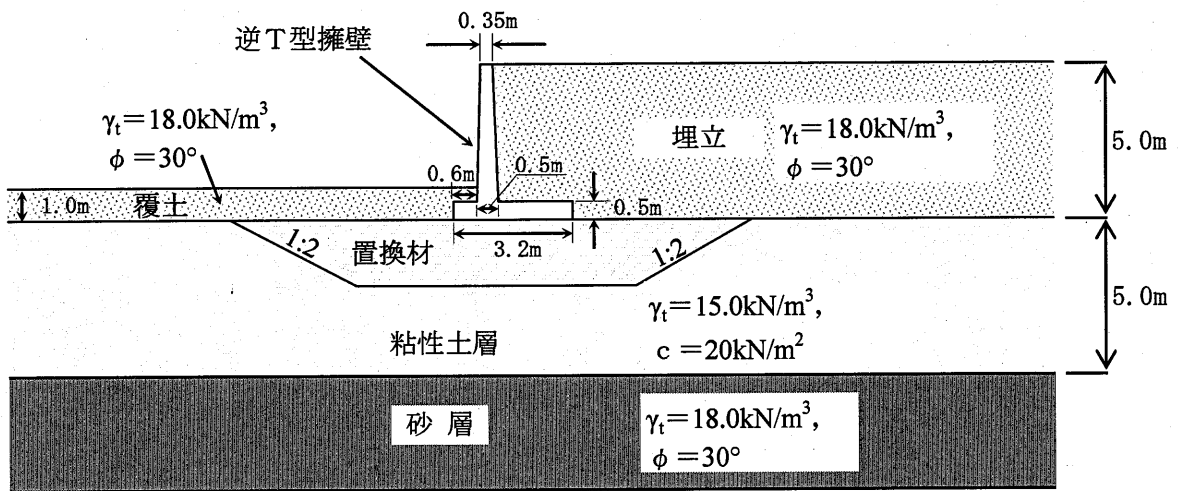


図 5.3.1 検討断面

- ・ 置換材

水砕スラグ：単位体積重量 $\gamma_t = 14.5 \text{ kN/m}^3$ ，せん断抵抗角 $\phi = 35^\circ$ ，粘着力 $c = 0 \text{ kN/m}^2$

天然砂：単位体積重量 $\gamma_t = 18.0 \text{ kN/m}^3$ ，せん断抵抗角 $\phi = 30^\circ$ ，粘着力 $c = 0 \text{ kN/m}^2$

- ・ 安全率

必要安全率は $F_s = 1.2$ (常時) とした

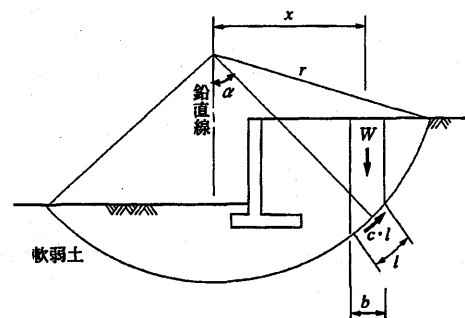
- ・ 適用基準

道路土工のり面工・斜面安定工指針 日本道路協会 平成 11 年

(2) 計算式

支持地盤の安定検討には、次式を用いる。

$$F_s = \frac{\sum \{c \cdot l + (W - u \cdot b) \cos \alpha \cdot \tan \phi\}}{\sum W \cdot \sin \alpha}$$

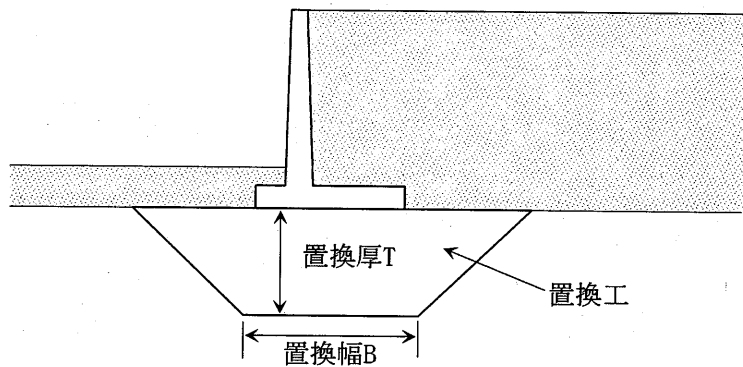


ここに,

- c : 仮想すべり面における粘着力 (kN/m²)
- ϕ : 仮想すべり面におけるせん断抵抗角 (°)
- u : 間隙水圧 (kN/m²)
- W : 各分割片の重量 (kN/m)
- l : 各分割片で切られたすべり面の弧長 (m)
- b : 各分割片の幅 (m)
- α : 各分割片で切られたすべり面の中心とすべり円の中心を結ぶ直線と鉛直線のなす角 (°)

(3) 計算結果

円形すべりの計算結果を以下に示す。水砕スラグを置換材として用いた場合には、天然砂を用いた場合と比較して、置換厚を1.5mから1.0mに低減することができた。また、設計上は考慮していないが、水砕スラグで置換した場合、固結により経時的にさらに支持力は増加する。

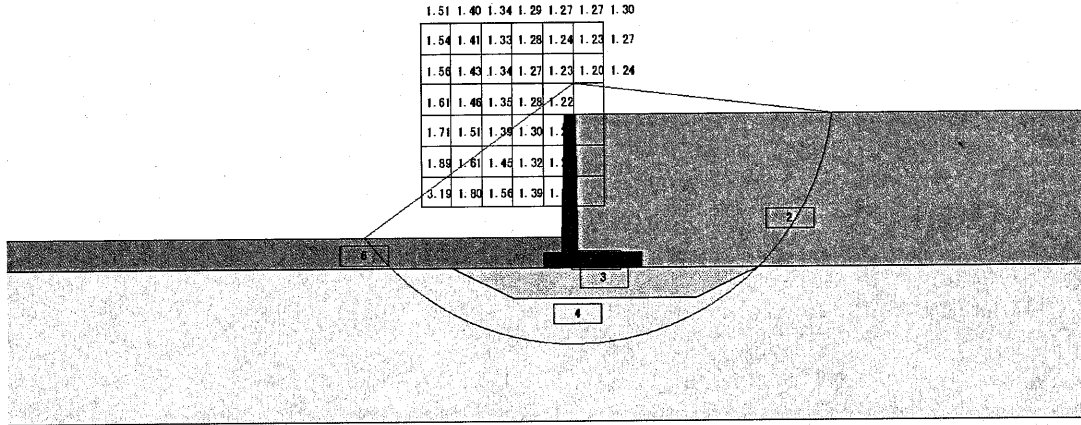


	置換厚 T (m)	置換幅 B (m)	必要置換材量 (m ³ /m)
水砕スラグ	1.0	6.0	8.0
天然砂	1.5	6.0	13.5

図 5.3.2 各ケースの置換厚および置換幅

最小安全率 $F_{sMIN} = 1.207$
 円弧の中心 $X = 1.00$ (m)
 $Y = 6.00$ (m)
 半径 $R = 8.50$ (m)
 抵抗モーメント $M_R = 2684.3$ (kN·m)
 起動モーメント $M_D = 2224.1$ (kN·m)

層番号	飽和重量 (kN/m ³)	湿潤重量 (kN/m ³)	内部摩擦角 (度)	粘着力 (kN/m ²)	粘着力の 一次係数	水平震度	鉛直震度
1	24.00	24.00	0.00	999.00	0.00	0.000	0.000
2	20.00	18.00	30.00	0.00	0.00	0.000	0.000
3	17.50	14.50	35.00	0.00	0.00	0.000	0.000
4	15.00	15.00	0.00	20.00	0.00	0.000	0.000
5	20.00	18.00	30.00	0.00	0.00	0.000	0.000
6	20.00	18.00	30.00	0.00	0.00	0.000	0.000

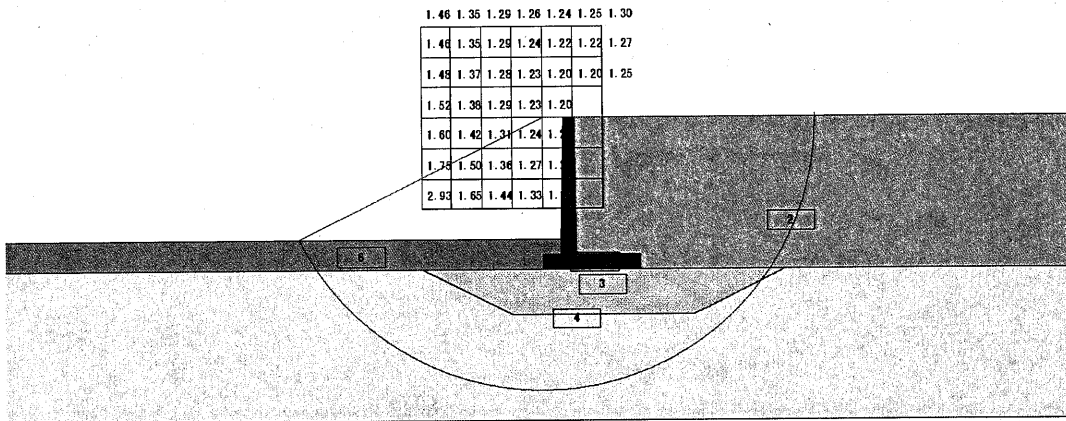


5

水砕スラグ

最小安全率 $F_{sMIN} = 1.205$
 円弧の中心 $X = 0.00$ (m)
 $Y = 5.00$ (m)
 半径 $R = 9.00$ (m)
 抵抗モーメント $M_R = 3389.4$ (kN·m)
 起動モーメント $M_D = 2812.0$ (kN·m)

層番号	飽和重量 (kN/m ³)	湿潤重量 (kN/m ³)	内部摩擦角 (度)	粘着力 (kN/m ²)	粘着力の 一次係数	水平震度	鉛直震度
1	24.00	24.00	0.00	999.00	0.00	0.000	0.000
2	20.00	18.00	30.00	0.00	0.00	0.000	0.000
3	20.00	18.00	30.00	0.00	0.00	0.000	0.000
4	15.00	15.00	0.00	20.00	0.00	0.000	0.000
5	20.00	18.00	30.00	0.00	0.00	0.000	0.000
6	20.00	18.00	30.00	0.00	0.00	0.000	0.000



5

天然砂

図 5.3.3 円形すべり結果

5.4. 盛土

水砕スラグは、せん断抵抗角が大きいことや水硬性を有していることから、盛土材として用いた場合には、天然材よりも法面勾配を急にすることができる(4.1.4 法面参照)。

水砕スラグは軽量であるため、軟弱地盤上での盛土材として用いた場合には、天然材よりも高くまで盛土を行うことができる。また、盛土高が同じ場合は、天然材よりも盛土に伴う沈下量が小さい。以下に示すのは、水砕スラグを盛土材として用いた場合の限界盛土高および沈下量を求めた設計例である。

5.4.1. 限界盛土高

(1) 設計条件

- ・盛土材料

表 5.4.1 盛土材料の単位体積重量

盛土材	湿潤単位体積重量 γ_t (kN/m^3)
水砕スラグ	14.5
天然砂	18.0

- ・適用基準

道路土工 軟弱地盤対策工指針 (社)日本道路協会 昭和 61 年

(2) 計算式

軟弱地盤上に水砕スラグで盛土を行う場合の限界盛土高は、次式によって求める。

$$H_{ec} = q_d / \gamma_E$$

ここに、

H_{ec} : 限界盛土高 (m)

γ_E : 盛土の単位体積重量 (kN/m^3)

q_d : 地盤の限界支持力 (表 5.4.2 による) (kN/m^2)

表 5.4.2 地盤の限界支持力

地盤条件	q_d
厚い粘土質地盤および黒泥、または有機質土が厚く堆積した泥炭質地盤	$3.6 c_u$
普通の粘土質地盤	$5.1 c_u$
薄い粘土質地盤および黒泥、または有機質土をほとんど挟まない薄い泥炭質地盤	$7.3 c_u$

※ c_u は地盤の粘着力

(3) 計算結果

限界盛土高の計算結果を図 5.4.1 に示す。水砕スラグは単位体積重量が天然砂よりも軽いため、天然砂を使用した場合より 1.25 倍の高さまで盛土を行うことができる。

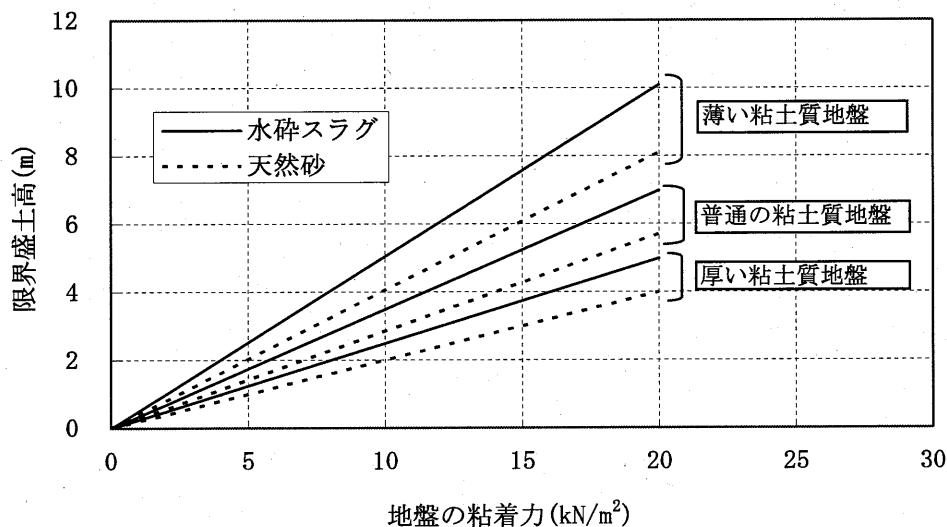


図 5.4.1 限界盛土高

5.4.2. 沈下量

(1) 設計条件

・ 検討断面

検討断面を図 5.4.2 に示す。

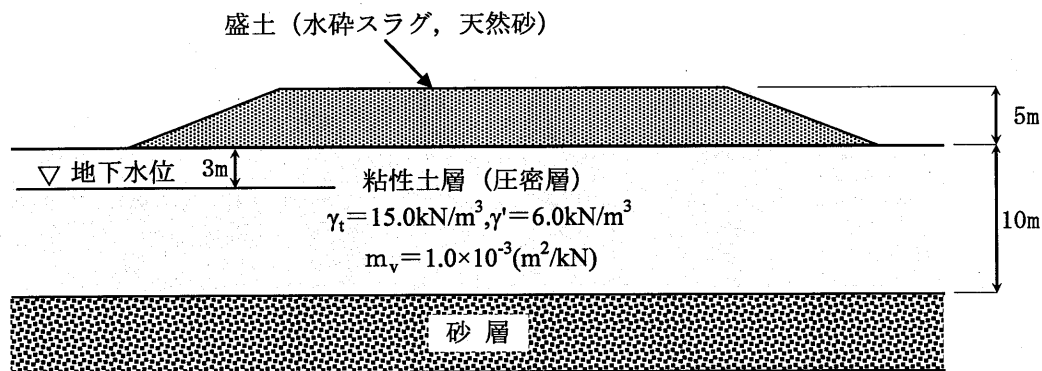


図 5.4.2 圧密沈下計算モデル

・ 盛土材料

水砕スラグ：単位体積重量 $\gamma_t = 14.5 \text{ kN/m}^3$

天然砂：単位体積重量 $\gamma_t = 18.0 \text{ kN/m}^3$

・盛土工程

盛土は 30 日間で載荷するものとした

(2) 計算式

圧密による最終沈下量は m_v 法によって求める。計算式を次に示す。

$$S = m_v \cdot \Delta p \cdot H$$

ここに、
 S : 最終沈下量(m)
 m_v : 体積圧縮係数 (m^2/kN)
 Δp : 盛土による増加応力 (kN/m^2)
 H : 軟弱層厚 (m)

(3) 計算結果

水砕スラグの単位体積重量($\gamma_t = 14.5kN/m^3$)は、天然砂の単位体積重量($\gamma_t = 18.0kN/m^3$)の約 0.8 倍である。また、水砕スラグ自体の沈下量はほぼ無視できるため、水砕スラグを用いて盛土を行った場合、天然砂を用いた場合に比べ最終沈下量は約 0.8 倍となる。沈下計算を行った結果、盛土中央部の最終沈下量は、天然砂で盛土した場合の 115cm に対して、水砕スラグで盛土した場合は 92cm となり、沈下量が軽減されている。

表 5.4.3 最終沈下量 (盛土中央部)

水砕スラグ	天然砂
92cm	115cm

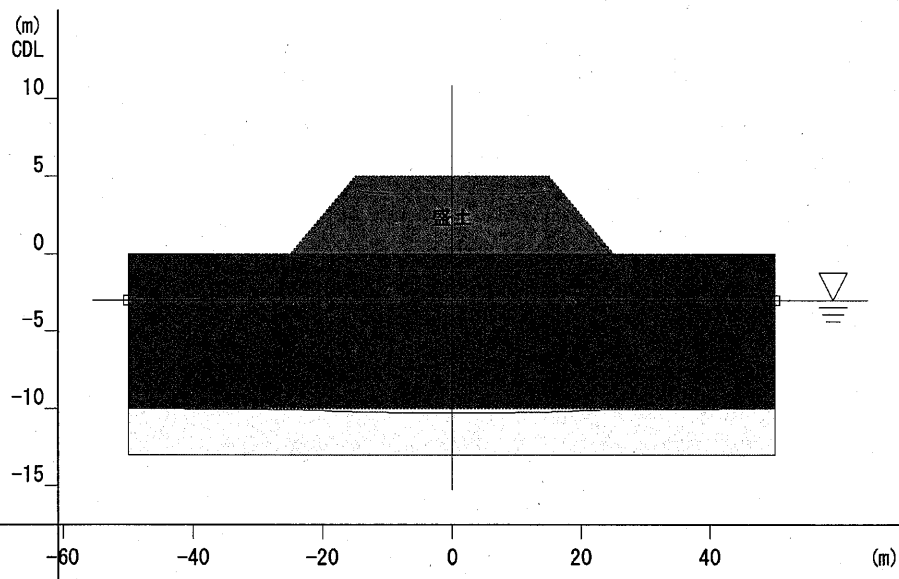


図 5.4.3 盛土の沈下形状

5.5. サンドコンパクションパイル

水砕スラグは、せん断抵抗角が大きいいため、サンドコンパクションパイルの材料として用いた場合、砂を用いた場合と同等以上の改良地盤を形成することができる。以下に示すのは、粘性土地盤上に盛土を行うための地盤の補強対策としてのサンドコンパクションパイルに水砕スラグを用いた場合の設計例である。なお、以下の設計例では水砕スラグの固結を考慮していないが、水砕スラグのせん断抵抗は固結に伴い増加するため、水砕スラグを用いた改良地盤の強度は経時的に増加する。

(1) 計算条件

・ 検討断面

検討断面を図 5.5.1 に示す。

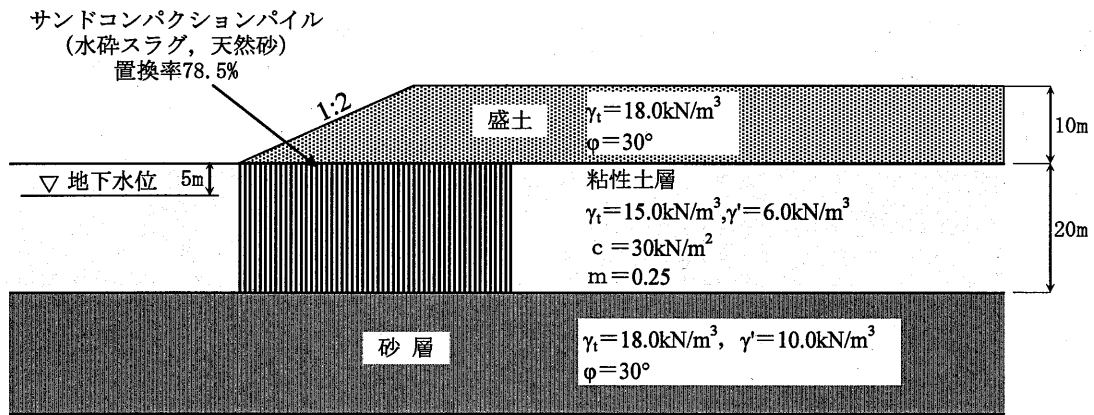


図 5.5.1 サンドコンパクションパイル検討断面

・ サンドコンパクションパイル材料

サンドコンパクションパイルに用いた水砕スラグの湿潤単位体積重量のデータは得られていない。しかし、「利用マニュアル」に示されているサンプリング結果では、水砕スラグを用いたサンドコンパクションパイルの飽和単位体積重量は、埋立てや覆土に用いた場合よりも 1.0kN/m^3 大きな値を示している⁴⁸⁾。そこで、本設計例においては、水砕スラグを用いたサンドコンパクションパイルの単位体積重量は、盛土や覆土材料として使用した場合よりも 1.0kN/m^3 大きい値とした。

表 5.5.1 サンドコンパクションパイル材料の諸元

サンドコンパクション パイル材料	単位体積重量 (kN/m^3)		せん断抵抗角 ϕ ($^\circ$)	粘着力 c (kN/m^2)
	湿潤 γ_t	水中 γ'		
水砕スラグ	15.5	8.5	35	0
天然砂	18.0	10.0	30	0

・適用基準

道路土工 軟弱地盤対策工指針 (社)日本道路協会 昭和 61 年

・安全率

必要安全率は, $F_s=1.25$ とした

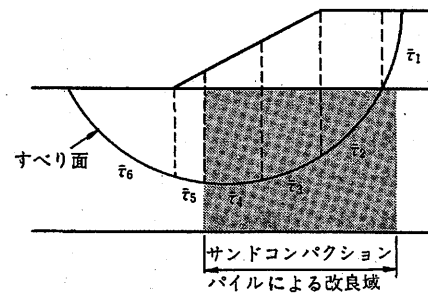
・改良幅

改良幅は必要安全率を確保できる最小幅(50cm ピッチ)とした.

(2) 計算式

斜面の安定計算は, 道路土工 軟弱地盤対策工指針 (社)日本道路協会 昭和 61 年 p159 に示されている円形すべり計算式によって行う. 計算式を以下に示す. なお, 応力分担比 n は 1 とし, 圧密度 U は 90% とした.

$$\bar{\tau} = a_s \cdot \left(\gamma'_s \cdot z + \frac{\sigma \cdot n}{1 + (n-1) \cdot a_s} \right) \cdot \cos^2 \alpha \cdot \tan \phi + (1 - a_s) \cdot \left\{ c_u + m \cdot \left(p_0 + \frac{\sigma}{1 + (n-1) \cdot a_s} - p_c \right) U \right\}$$



- ここに,
- z : すべり面の深度 (m) すべり断面
 - a_s : 砂杭による置換率
 - γ'_s : 砂杭の水中単位体積重量 (kN/m^3)
 - ϕ : 砂杭のせん断抵抗角 ($^\circ$)
 - c_u : 粘性土の初期粘着力 (kN/m^2)
 - m : 粘性土の強度増加率
 - p_0 : 土かぶり圧 (kN/m^2)
 - p_c : 圧密降伏応力 (kN/m^2)
 - U : 粘性土部分の圧密度

(3) 計算結果

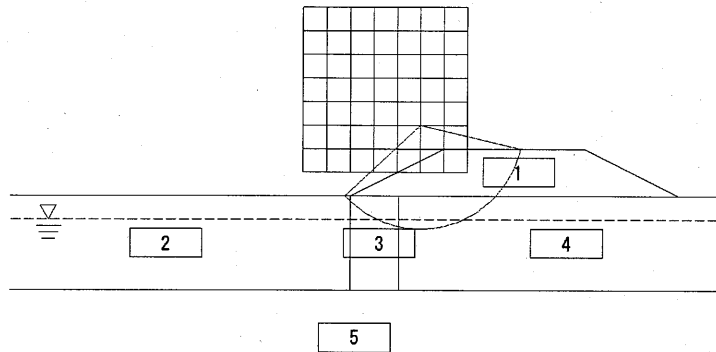
計算の結果, サンドコンパクションパイルの材料を水砕スラグとすることによって, 改良幅を 50cm 短くすることができた. また, 設計上は考慮していないが, 固結により経時的にさらに強固な改良地盤となる.

表 5.5.2 計算結果

サンドコンパクションパイル材料	水砕スラグ	天然砂
改良幅(m)	10.5	11.0

層番号	飽和重量 (kN/m^3)	湿潤重量 (kN/m^3)	内部摩擦角 (度)	粘着力 (kN/m^2)	粘着力の 一次係数	水平震度	鉛直震度
1	20.00	18.00	30.00	0.00	0.00	0.000	0.000
2	18.00	15.00	0.00	30.00	0.00	0.000	0.000
3	18.00	15.00	0.00	30.00	0.00	0.000	0.000
4	18.00	15.00	0.00	30.00	0.00	0.000	0.000
5	20.00	18.00	30.00	0.00	0.00	0.000	0.000

地層番号	砂ぐいの 置換率	砂ぐいの 飽和重量 (kN/m^3)	砂ぐいの 湿潤重量 (kN/m^3)	砂ぐいの 内部摩擦角 (度)	応力 分担比	原地盤の 強度 増加率	原地盤の 圧密度	原地盤の $P_0 - P_0$ (kN/m^2)
3	0.785	18.50	15.50	35.00	1	0.250	0.90	0.00

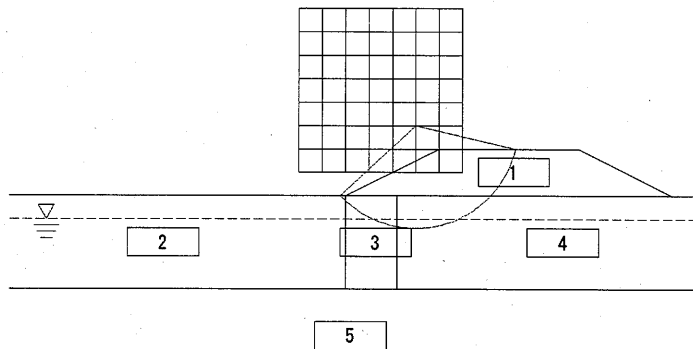


最小安全率	$F S_{MIN} =$	1.255
円弧の中心	X =	15.00 (m)
	Y =	15.00 (m)
半径	R =	22.00 (m)
抵抗モーメント	$M_R =$	35593.6 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)
起動モーメント	$M_D =$	28358.7 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)

図 5.5.2 安定計算結果 (水砕スラグサンドコンパクションパイル, 改良幅 10.5m)

層番号	飽和重量 (kN/m^3)	湿潤重量 (kN/m^3)	内部摩擦角 (度)	粘着力 (kN/m^2)	粘着力の 一次係数	水平震度	鉛直震度
1	20.00	18.00	30.00	0.00	0.00	0.000	0.000
2	18.00	15.00	0.00	30.00	0.00	0.000	0.000
3	18.00	15.00	0.00	30.00	0.00	0.000	0.000
4	18.00	15.00	0.00	30.00	0.00	0.000	0.000
5	20.00	18.00	30.00	0.00	0.00	0.000	0.000

地層番号	砂ぐいの 置換率	砂ぐいの 飽和重量 (kN/m^3)	砂ぐいの 湿潤重量 (kN/m^3)	砂ぐいの 内部摩擦角 (度)	応力 分担比	原地盤の 強度 増加率	原地盤の 圧密度	原地盤の $P_0 - P_0$ (kN/m^2)
3	0.785	20.00	18.00	30.00	1	0.250	0.90	0.00



最小安全率	$F S_{MIN} =$	1.273
円弧の中心	X =	15.00 (m)
	Y =	15.00 (m)
半径	R =	22.00 (m)
抵抗モーメント	$M_R =$	35057.8 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)
起動モーメント	$M_D =$	27550.1 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)

図 5.5.3 安定計算結果 (天然砂サンドコンパクションパイル, 改良幅 11.0m)

6. 水砕スラグ使用事例

6.1. 水砕スラグ単体で使用した事例

6.1.1. 路床

施工場所	君津市六手地内 県道萩作・君津線	施主	千葉県スラグ研究会
------	------------------	----	-----------

概要 君津市内の県道において、平成9年に路床用水砕スラグの実路における試験施工を行った。7年経過後の調査の結果、水砕スラグ使用工区と処理山砂使用工区とでは、平坦性やわだち掘れなどの路面性状において差はなく、いずれも良好な状態であった。また、水砕スラグを用いた路床のFWD(重錘落下式たわみ測定装置)で測定した弾性係数は、処理山砂(普通ポルトランドセメント2%混合)を用いた路床の弾性係数よりも高い値を示した。

施工断面

処理山砂使用工区		水砕スラグ使用工区	
表層(再生密粒)	5cm	表層(再生密粒)	
中間層(再生密粒)	5cm	中間層(再生密粒)	
基層(再生密粒)	5cm	基層(再生密粒)	
上層路盤(HMS25)	20cm	上層路盤(HMS25)	
下層路盤(CS40)	24cm	下層路盤(CS40)	
置き換え材料・ 処理山砂	60cm	置き換え材料・ 水砕スラグ	
敷き均し縮固め1層20cm		敷き均し 2層敷き 縮固め 1層転圧	

施工条件

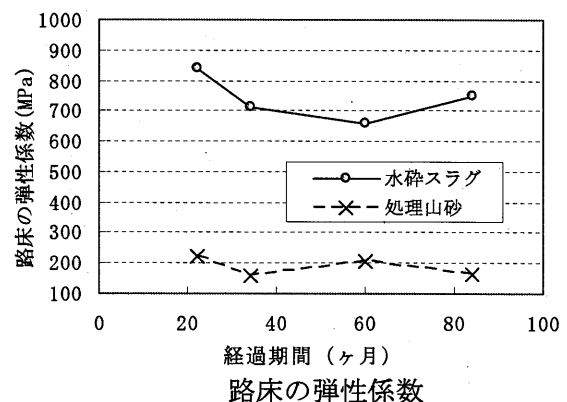
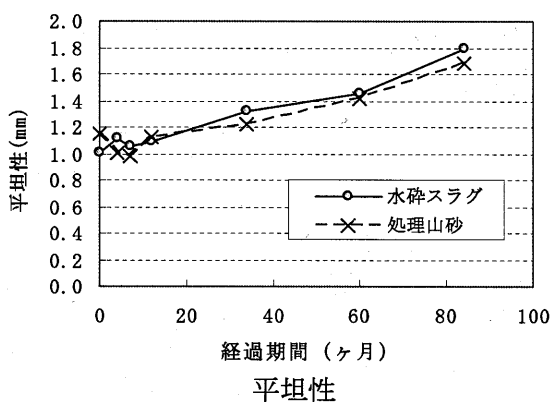
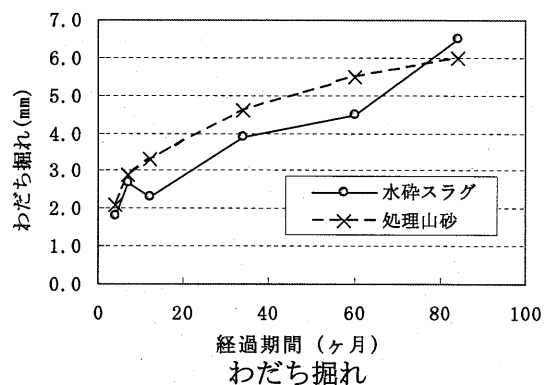
施工面積 : 2,250m²

締固め層厚

水砕スラグ : 60cm/層

処理山砂 : 20cm/層

試験結果

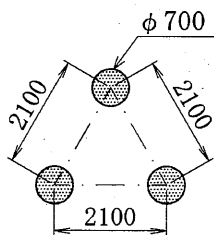


6.1.2. サンドコンパクションパイル（その1）

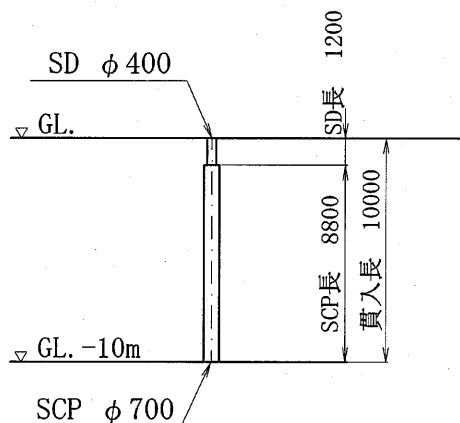
施工場所 | 新日本製鐵(株) 大分製鐵所 | 施主 | 新日本製鐵(株)

概要 屋外貯蔵関連施設を建設する現場において、GL-10m までの地盤の液状化対策として、水砕スラグを用いたサンドコンパクションパイルを打設した。打設後の杭間 N 値は目標 N 値(>15)を十分確保できており、水砕スラグがサンドコンパクションパイルの材料として有用であることが確認できた。

施工断面



パイル配置詳細図



杭断面図

施工条件

目標 N 値：15

改良深度：GL-10m

改良諸元：杭径 $\phi 700$ ，杭ピッチ 2.1m（三角形配置），置換率 10.1%

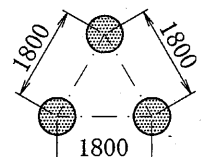
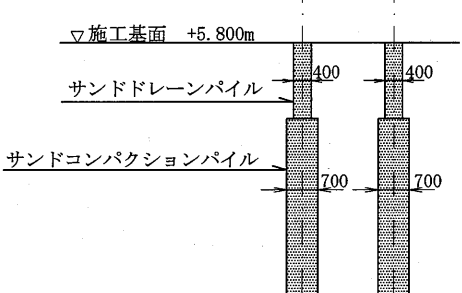
打設方法：静的締固め砂杭工法（SAVE コンポーザー）

改良範囲：直径 31.45m，円形

試験結果

ボーリング No.	杭径 (mm)	杭ピッチ (m)	改良前 平均 N 値	改良後 平均 N 値
A	700	2.10	14	24(>15)
B	700	2.10	15	17(>15)
C	700	2.10	13	21(>15)

6.1.3. サンドコンパクションパイル (その2)

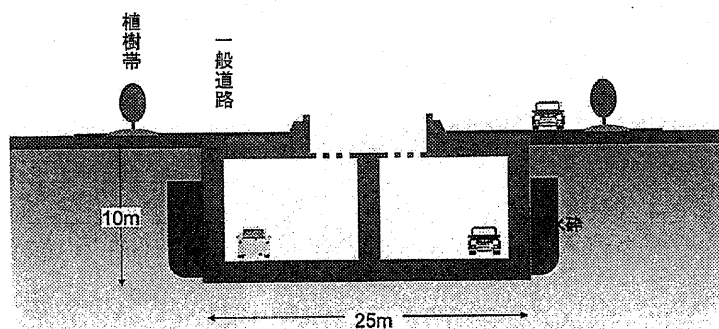
施工場所	宮崎市港東3丁目	施主	宮崎県石油基地株式会社																																																																																																																																																																										
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> 概要 </div> <p>屋外貯蔵関連施設を建設する現場において、GL-14.8m までの地盤の液状化対策として、水砕スラグを用いたサンドコンパクションパイルを打設した。打設後は液状化しない程度にまで杭間N値が増加しており、水砕スラグがサンドコンパクションパイルの材料として有用であることが確認できた。</p>																																																																																																																																																																													
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> 施工断面 </div>  <ul style="list-style-type: none"> ・ サンドコンパクションパイル φ700 ・ 正三角形配置 c.t.c 1800 ・ 砂圧入量: 0.385 m³/m <p style="text-align: center;">杭配置図</p>		 <p style="text-align: center;">杭断面図</p>																																																																																																																																																																											
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> 施工条件 </div> <p>改良深度: GL-14.8m 改良諸元: 杭径φ700, 杭ピッチ1.8m (三角形配置), 置換率13.7% 打設方法: 静的締固め砂杭工法 (SAVE コンポーザー)</p>																																																																																																																																																																													
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> 試験結果 </div> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="5">孔番号 T-2 №1 (タンク中央部)</th> <th colspan="5">孔番号 T-2 №2 (タンク外周部)</th> </tr> <tr> <th>測定深度GL(m)</th> <th>N値</th> <th>Fc(%)</th> <th>D50(mm)</th> <th>液状化判定</th> <th>測定深度GL(m)</th> <th>N値</th> <th>Fc(%)</th> <th>D50(mm)</th> <th>液状化判定</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1.50 ~ 1.80</td><td>15</td><td></td><td></td><td>○</td><td>1.50 ~ 1.80</td><td>25</td><td></td><td></td><td>○</td></tr> <tr><td>2.50 ~ 2.80</td><td>19</td><td></td><td></td><td>○</td><td>2.50 ~ 2.80</td><td>23</td><td></td><td></td><td>○</td></tr> <tr><td>3.50 ~ 3.80</td><td>17</td><td></td><td></td><td>○</td><td>3.50 ~ 3.80</td><td>20</td><td></td><td></td><td>○</td></tr> <tr><td>4.50 ~ 4.80</td><td>19</td><td></td><td></td><td>○</td><td>4.50 ~ 4.80</td><td>21</td><td></td><td></td><td>○</td></tr> <tr><td>5.50 ~ 5.80</td><td>21</td><td></td><td></td><td>○</td><td>5.50 ~ 5.80</td><td>21</td><td></td><td></td><td>○</td></tr> <tr><td>6.50 ~ 6.80</td><td>17</td><td></td><td></td><td>○</td><td>6.50 ~ 6.80</td><td>15</td><td></td><td></td><td>○</td></tr> <tr><td>7.50 ~ 7.80</td><td>15</td><td></td><td></td><td>○</td><td>7.50 ~ 7.80</td><td>10</td><td>98</td><td>0.008</td><td>○</td></tr> <tr><td>8.50 ~ 8.80</td><td>7</td><td>98</td><td>0.007</td><td>○</td><td>8.50 ~ 8.80</td><td>7</td><td>98</td><td>0.008</td><td>○</td></tr> <tr><td>9.50 ~ 9.80</td><td>19</td><td></td><td></td><td>○</td><td>9.50 ~ 9.80</td><td>15</td><td>25</td><td>0.249</td><td>○</td></tr> <tr><td>10.50 ~ 10.80</td><td>12</td><td>17</td><td>0.260</td><td>○</td><td>10.50 ~ 10.80</td><td>11</td><td>22</td><td>0.246</td><td>○</td></tr> <tr><td>11.50 ~ 11.80</td><td>24</td><td></td><td></td><td>○</td><td>11.50 ~ 11.80</td><td>21</td><td></td><td></td><td>○</td></tr> <tr><td>12.50 ~ 12.80</td><td>19</td><td></td><td></td><td>○</td><td>12.50 ~ 12.80</td><td>23</td><td></td><td></td><td>○</td></tr> <tr><td>13.50 ~ 13.80</td><td>21</td><td></td><td></td><td>○</td><td>13.50 ~ 13.80</td><td>21</td><td></td><td></td><td>○</td></tr> <tr><td>14.50 ~ 14.80</td><td>12</td><td>18</td><td>0.166</td><td>○</td><td>14.50 ~ 14.80</td><td>5</td><td>54</td><td>0.052</td><td>○</td></tr> <tr> <td colspan="2">平均N値</td> <td colspan="3">16.9</td> <td colspan="2">平均N値</td> <td colspan="3">17.0</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right; font-size: small;">※液状化判定 ○:液状化しない ×:液状化する</p>				孔番号 T-2 №1 (タンク中央部)					孔番号 T-2 №2 (タンク外周部)					測定深度GL(m)	N値	Fc(%)	D50(mm)	液状化判定	測定深度GL(m)	N値	Fc(%)	D50(mm)	液状化判定	1.50 ~ 1.80	15			○	1.50 ~ 1.80	25			○	2.50 ~ 2.80	19			○	2.50 ~ 2.80	23			○	3.50 ~ 3.80	17			○	3.50 ~ 3.80	20			○	4.50 ~ 4.80	19			○	4.50 ~ 4.80	21			○	5.50 ~ 5.80	21			○	5.50 ~ 5.80	21			○	6.50 ~ 6.80	17			○	6.50 ~ 6.80	15			○	7.50 ~ 7.80	15			○	7.50 ~ 7.80	10	98	0.008	○	8.50 ~ 8.80	7	98	0.007	○	8.50 ~ 8.80	7	98	0.008	○	9.50 ~ 9.80	19			○	9.50 ~ 9.80	15	25	0.249	○	10.50 ~ 10.80	12	17	0.260	○	10.50 ~ 10.80	11	22	0.246	○	11.50 ~ 11.80	24			○	11.50 ~ 11.80	21			○	12.50 ~ 12.80	19			○	12.50 ~ 12.80	23			○	13.50 ~ 13.80	21			○	13.50 ~ 13.80	21			○	14.50 ~ 14.80	12	18	0.166	○	14.50 ~ 14.80	5	54	0.052	○	平均N値		16.9			平均N値		17.0		
孔番号 T-2 №1 (タンク中央部)					孔番号 T-2 №2 (タンク外周部)																																																																																																																																																																								
測定深度GL(m)	N値	Fc(%)	D50(mm)	液状化判定	測定深度GL(m)	N値	Fc(%)	D50(mm)	液状化判定																																																																																																																																																																				
1.50 ~ 1.80	15			○	1.50 ~ 1.80	25			○																																																																																																																																																																				
2.50 ~ 2.80	19			○	2.50 ~ 2.80	23			○																																																																																																																																																																				
3.50 ~ 3.80	17			○	3.50 ~ 3.80	20			○																																																																																																																																																																				
4.50 ~ 4.80	19			○	4.50 ~ 4.80	21			○																																																																																																																																																																				
5.50 ~ 5.80	21			○	5.50 ~ 5.80	21			○																																																																																																																																																																				
6.50 ~ 6.80	17			○	6.50 ~ 6.80	15			○																																																																																																																																																																				
7.50 ~ 7.80	15			○	7.50 ~ 7.80	10	98	0.008	○																																																																																																																																																																				
8.50 ~ 8.80	7	98	0.007	○	8.50 ~ 8.80	7	98	0.008	○																																																																																																																																																																				
9.50 ~ 9.80	19			○	9.50 ~ 9.80	15	25	0.249	○																																																																																																																																																																				
10.50 ~ 10.80	12	17	0.260	○	10.50 ~ 10.80	11	22	0.246	○																																																																																																																																																																				
11.50 ~ 11.80	24			○	11.50 ~ 11.80	21			○																																																																																																																																																																				
12.50 ~ 12.80	19			○	12.50 ~ 12.80	23			○																																																																																																																																																																				
13.50 ~ 13.80	21			○	13.50 ~ 13.80	21			○																																																																																																																																																																				
14.50 ~ 14.80	12	18	0.166	○	14.50 ~ 14.80	5	54	0.052	○																																																																																																																																																																				
平均N値		16.9			平均N値		17.0																																																																																																																																																																						
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>ボーリング No.</th> <th>杭径 (mm)</th> <th>杭ピッチ (m)</th> <th>改良前 平均N値</th> <th>改良後 平均N値</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>700</td> <td>1.80</td> <td>10.3</td> <td>16.9</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>700</td> <td>1.80</td> <td>9.6</td> <td>17.0</td> </tr> </tbody> </table>				ボーリング No.	杭径 (mm)	杭ピッチ (m)	改良前 平均N値	改良後 平均N値	1	700	1.80	10.3	16.9	2	700	1.80	9.6	17.0																																																																																																																																																											
ボーリング No.	杭径 (mm)	杭ピッチ (m)	改良前 平均N値	改良後 平均N値																																																																																																																																																																									
1	700	1.80	10.3	16.9																																																																																																																																																																									
2	700	1.80	9.6	17.0																																																																																																																																																																									

6.1.4. 半地下道路構造物裏埋め材

施工場所 名古屋市緑区（東名阪自動車道） 施主 中日本高速道路株式会社

概要 東名阪自動車道の名古屋市緑区大高町～鳴海町間にある半地下道路構造物の埋戻し材として水砕スラグが用いられた。当初予定の現地転用土では発生時期と埋戻し時期とに時間差があり、品質が不安定であることから、代替品が必要とされていた。水砕スラグは、安定供給と安定した品質が期待でき、天候に左右されない良好な施工性を有すること、せん断抵抗角が大きく土圧が軽減でき初期転圧で沈下が安定することなど、埋戻し材としての長所を有することから採用された。

施工断面



断面図

施工条件

簡易ホッパーを用いて水砕スラグを所定の位置に投入した後、水締めによる締固めを行った。

使用実績

水砕スラグ使用数量

工区	使用数量(t)	使用時期
4工区計	68,000	2003.12 ~ 2007.3

6.1.5. 擁壁裏込め材

施工場所	千葉市若葉区	施主	千葉市建設局
------	--------	----	--------

概要 千葉市若葉区高品町の新町若松町線の既存擁壁付近での街路等の築造工事において、平成11年に既存擁壁の裏込め材として、主働土圧の軽減を目的として水砕スラグが採用された。

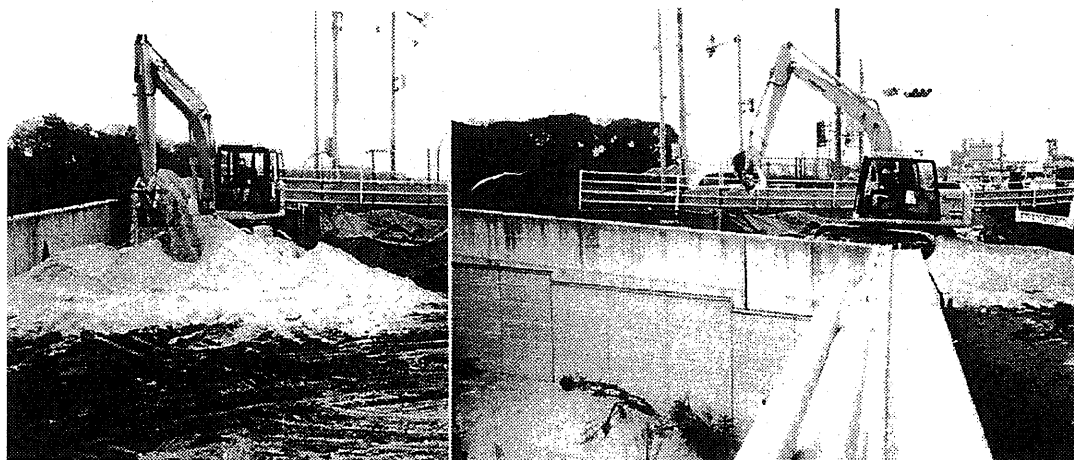
水砕スラグと山砂の土圧合力（計算値）の比較

	材料の 単位体積重量 γ (kN/m ³)	壁面の 高さ H (m)	せん断 抵抗角 ϕ (°)	主働土圧合力 P_A (kN/m)
水砕スラグ	14.5	3	35	17.7
山砂（比較材）	18.0	3	28	29.2

$$P_A = 1/2 \gamma H^2 \tan^2(45^\circ - \phi/2)$$

- P_A : 主働土圧 (kN/m)
- γ : 材料の単位体積質量 (kN/m³)
- H : 壁面の高さ (m)
- ϕ : せん断抵抗角 (°)

施工状況



撒き出し状況

既設擁壁

使用実績

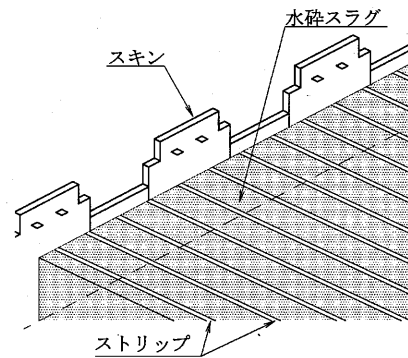
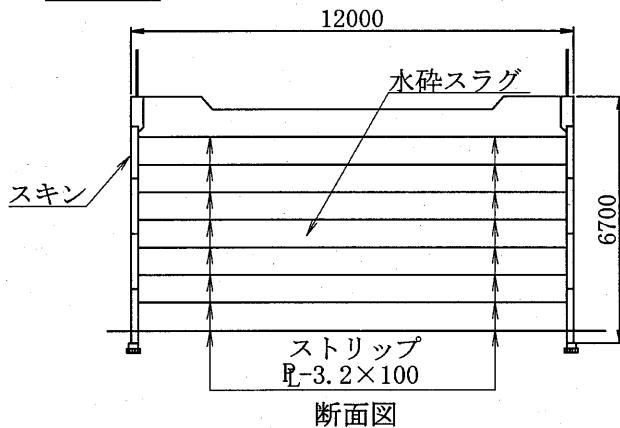
使用数量：約 150m³

6.1.6. テールアルメ工法⁴⁹⁾

施工場所	倉敷市玉島	施主	倉敷市
------	-------	----	-----

概要 岡山県倉敷市玉島1丁目において、国道2号線をまたぐ橋梁の取付擁壁に、水砕スラグを盛土材として用いたテールアルメ工法が採用された。テールアルメ工法とは、盛土中にストリップと呼ばれる補強材を敷設し、ストリップと盛土材との間に生じる摩擦力を利用して鉛直な法面の盛土を形成する工法であり、軽量でせん断抵抗角が大きいという水砕スラグの特性を有効活用できる。盛土完成後に行った引抜試験の結果、ストリップの摩擦力は、盛土完成直後でも通常の砂(摩擦係数:0.4~0.7程度)の数倍となり、5ヶ月後にはさらに増大していた。

施工断面



施工条件

盛土幅 : 12.0m
 盛土高さ : 6.7m
 延長 : 173.7m

試験結果

試験より 求めた 摩擦係数	盛土完成直後		盛土完成5ヶ月後	
	$f_1 = 1.872$	平均 2.029	$f_1' = 3.042$	平均 3.766
$f_2 = 1.755$	$f_2' = 3.754$			
$f_3 = 2.460$	$f_3' = 4.502$			

注) 摩擦係数 (f) は次式より求めた

$$f = \frac{P}{2 \cdot \gamma \cdot h \cdot b \cdot l}$$

ここで、
 P : 最大引抜力 (kN)
 γ : 水砕スラグ単位体積重量 (kN/m³)
 h : ストリップ上の土かぶり厚さ (m)
 b : ストリップの幅 (m)
 l : ストリップの土中長さ (m)

使用実績

テールアルメ工法壁面積 : 1,453.8m², 水砕スラグ使用数量 : 約 11,710m³

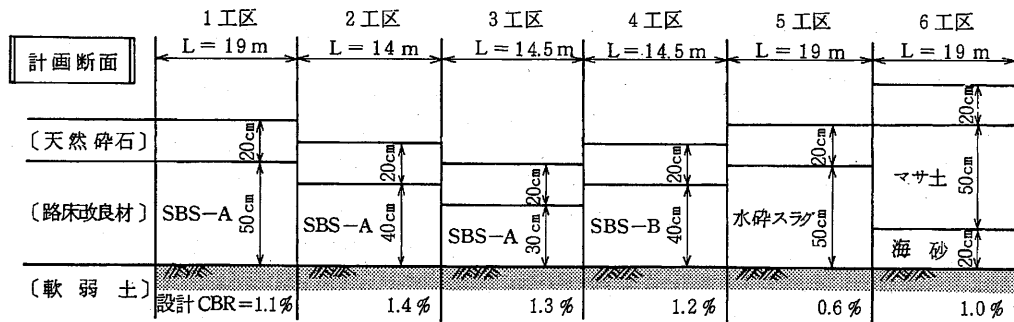
6.2. 固結促進工を併用して使用した事例

6.2.1. 強化路床工法

施工場所 新日本製鐵 広畑製鐵所 構内・西浜 施主 新日本製鐵(株), (株)神戸製鋼所

概要 水砕スラグにアルカリ刺激剤として転炉スラグ粉(-5mm)を配合した材料は、水砕スラグの粒度構成を改善するため土工用材料としての諸特性が向上し、さらに、消石灰やセメント添加に匹敵する水硬性を有する材料となる。これを軟弱路床強化材料として位置付けるべく、兵庫県土木部の指導を得て試験施工した内容を紹介する。(以下この材料をスーパーブラストサンド (SBS) と呼ぶ)

施工断面 (軟弱度の状況：浚渫土砂シルト分 60%，粘度分 40%，含水比 70%)



(幅員は各工区とも 5m)

使用材料

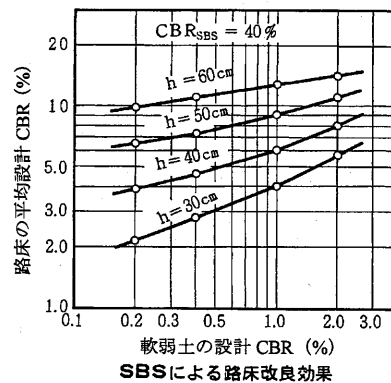
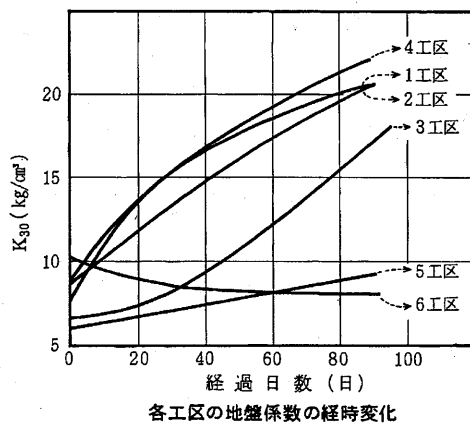
	アルカリ刺激剤	配合率
SBS-A	転炉スラグ(-3mm)	GS : LD = 10 : 3
SBS-B	転炉スラグ(-5mm)	同 上
比較材	水砕スラグ 海砂+マサ土	

GS:水砕スラグ, LD:転炉スラグ

施工条件

項目	内容
撒き出し方法	湿地ブルドーザーによる一層撒き出し
転圧方法	碎石上からタイヤローラーで8回
施工直後試験	現場密度、断面厚
追跡試験 (一年間)	平板載荷、たわみ、コア採取

試験結果



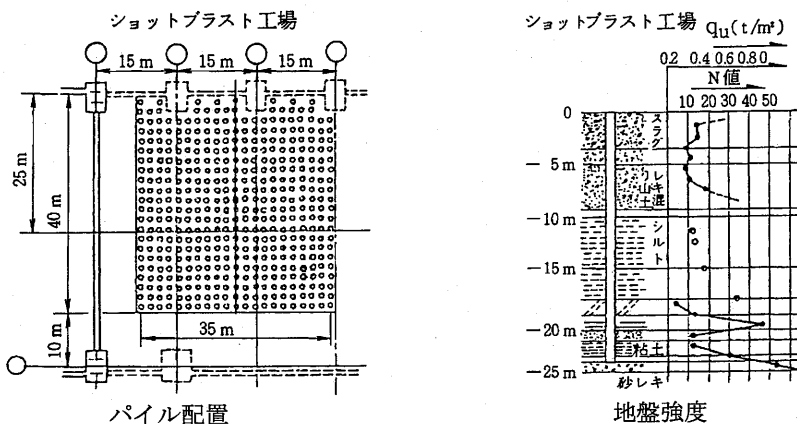
6.2.2. 強化コンパクションパイル工法

施工場所 日本鋼管 福山製鉄所ショットブラスト工場 施主 日本鋼管株式会社

概要 水砕スラグの水硬性を利用することにより地盤改良用砂杭としての機能の他に基礎杭としての機能を持たせた工法であり、次のような特長を有する。

- ① 軟弱地盤において、施工初期はドレーンあるいはコンパクションパイルとして働き、水硬性の発現とともに基礎杭として働く。
- ② 比較的良好な地盤では、RC杭などの代替として使用できる。

施工断面



使用材料

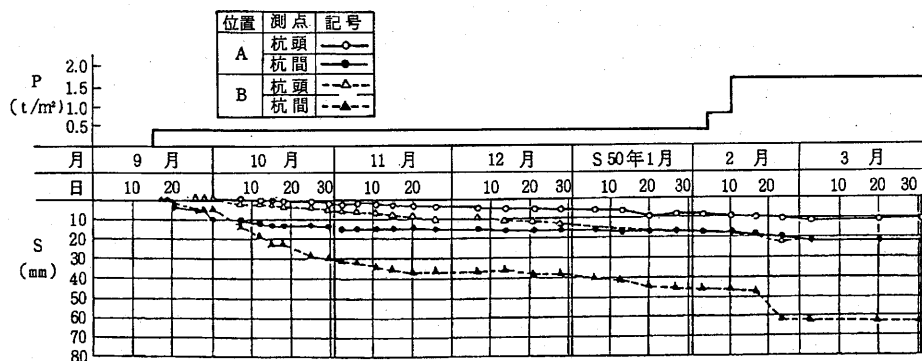
アルカリ刺激剤	配合率
生石灰(-5mm)	GS : CaO = 85 : 15 GS:水砕スラグ

施工条件

項目	内容
打設方式	コンパクションパイル方式
打設仕様	ピッチ : 1.8m、本数 : 441本、 杭長 : 24m

試験結果

土層	養生期間 (月)	最小乾燥密度 γ_d (g/cm ³)	設計圧縮強度 σ_{cd} (N/mm ²)	長期許容圧縮応力度 σ_{PA} (N/mm ²)	杭断面積 A_p (m ²)	σ_{PA} からの許容支持力(kN/本)	載荷試験からの許容支持力(kN/本)
埋立土	2	1.325	3.19	1.06	0.32	339.4	235.4
シルト		1.280	2.01	0.67	0.34	227.6	



ショットブラスト工場沈下測定結果

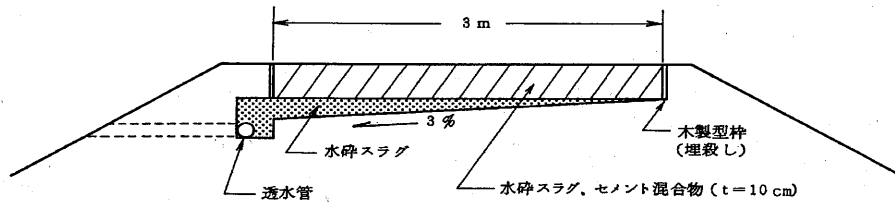
6.2.3. 軽舗装工法

施工場所 岡山県 吉備路自転車道 施主 岡山県土木部

概要 水砕スラグにアルカリ刺激剤としてセメントを配合した材料は、これらの目的に適しており、経済性も優れている。

この工法では、施工後半月程度の養生期間をとれば、アスファルト舗装することなく表面処理剤の散布程度で十分使用目的を果たすことができる。

施工断面

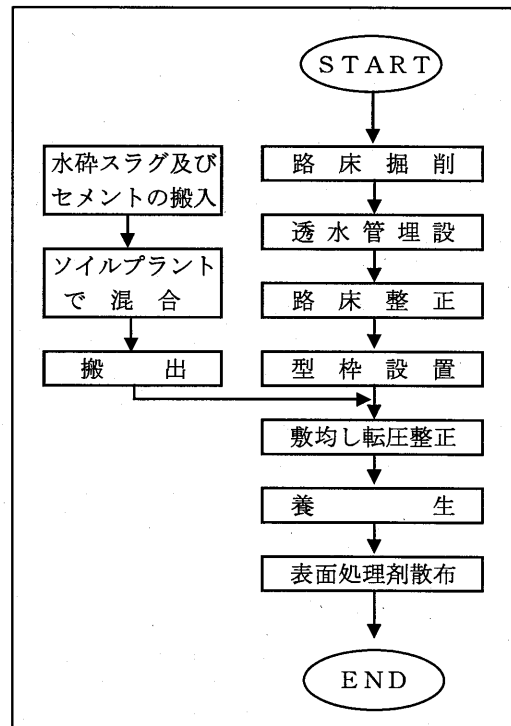


使用材料

アルカリ刺激剤	配合率
ポルトランドセメント	GS : PC = 88 : 12

GS:水砕スラグ, PC:普通ポルトランドセメント

施工順序



施工条件

- 1)セメントと水砕スラグの混合ムラを生じないようにできるだけ中央混合方式をとること。
- 2)過剰転圧によるベース材表面の水砕スラグ粒子の破碎を避けるため軽量の振動ローラー等でよく締固め、不陸修正はタンパで行う。
- 3)クラックの予防処置として 10m 毎にスレート製の目地を設ける。
- 4)表面処理は養生が終わった時点 (q_u が設計値に達した時) でリシンガン等で散布する。

試験結果

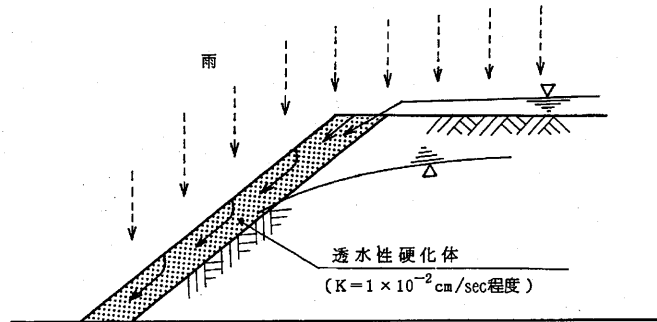
セメント量 (kg/m ³)	室内試験値 材令7日 q_u (N/mm ²)	設計値 材令7日 q_u (N/mm ²)
120	1.57	0.78
100	1.08	0.49
80	0.73	0.29

6.2.4. 法面防護工法

施工場所	岡山県	施工主	岡山県土木部
------	-----	-----	--------

概要 道路や住宅地における盛土の法面崩壊を防止する工法を紹介する。水砕スラグに少量のセメントを配合した材料を法面に設置すると、透水性硬化体となり、雨滴のエネルギーを吸収すると同時に表面水の排水経路となって法面崩壊を誘引する洗掘れや土粒子の乱れを防止する。さらに降雨による背面の滞留水の排出もよりスムーズに行われるなどの効果がある。

施工断面



使用材料

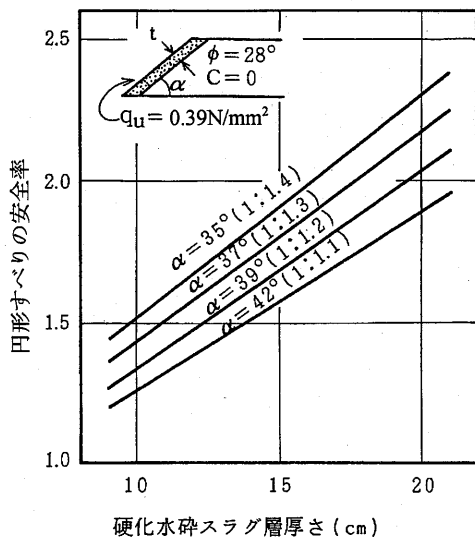
アルカリ刺激剤	配合率
セメント	GS:PC=92:8

GS:水砕スラグ, PC:普通ポルトランドセメント

施工条件

項目	内容
設計強度	一軸圧縮強さ 7日養生で0.39N/mm ²
転圧方法	タンパ
硬化体厚さ	現場の状況によるが 15~20cm

試験結果



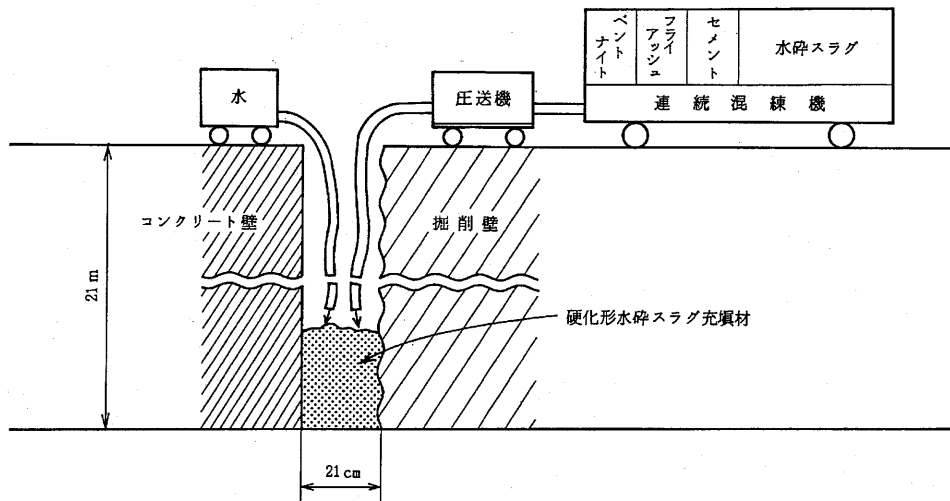
施工厚さと安全率

6.2.5. 充填材

施工場所 神戸市 神戸地下鉄 山手線 施主 神戸市交通局

概要 地下構造物を構築する場合、構造物と在来地盤との間にコンクリート型枠間隙が生ずる。この間隙の充填材として、硬化形水砕スラグを用いた工事例を紹介する。この工法では、充填材は連続混練機によるドライモルタルとして、空気圧送し、水は間隙の中で充填材に散水する形で加えている。

施工断面



使用材料

材 料	配 合 率
水 砕 ス ラ グ	89.5%
セ メ ン ト	3.3%
フ ラ イ ア ッ シ ュ	3.6%
ベ ン ト ナ イ ト	3.6%

施工条件

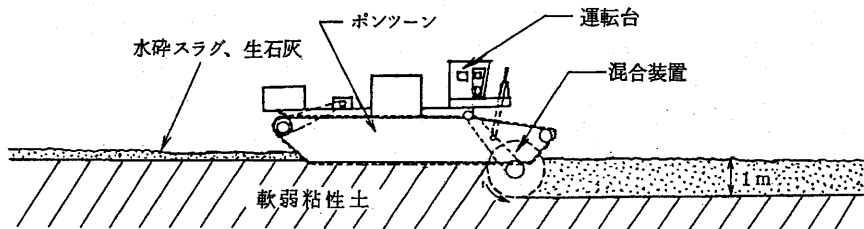
項 目	内 容
設 計 強 度	一軸圧縮強さ 28日養生で0.29N/mm ² 以上
充 填 方 法	連続混練機によるドライモルタル 空気圧送、水は間隙内で散水

6.2.6. 表層安定処理工法

施工場所 新日本製鐵(株)君津製鐵所西側埋立地 施主 新日本製鐵(株)

概要 浚渫ヘドロで埋立した軟弱粘性の表層 1m 程度を道路建設用地とするために水砕スラグと生石灰を散布し、スタビライザーで攪拌混合して地盤改良を行った例を紹介する。改良の目標値を施工後 10 日間で現場 CBR=10% としたが、含水比の高い部分以外は目標値を達成した。含水比の高い部分も 28 日で目標値に達した。

施工断面



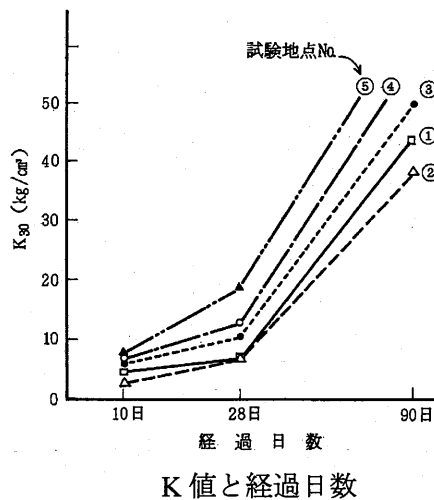
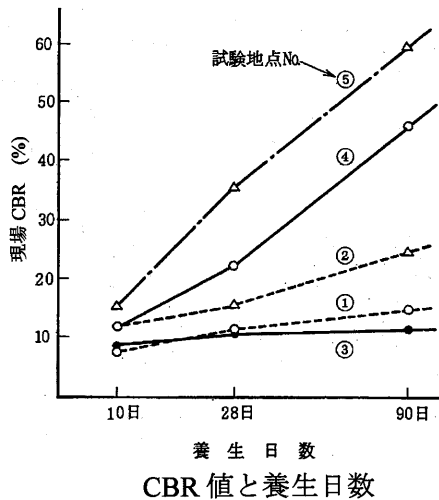
使用材料

アルカリ刺激剤	配合率
生石灰 (20mm粒状)	GS : CaO : 粘性土 = 20% : 4% : 80% (CaOは外数) GS:水砕スラグ

施工条件

項目	内容
粘性土物性	自然含水比75%、粘土分27%、 シルト分67%、砂分6% 土粒子比重2.46
施工面積	6500m ²
改良目標値	施工後10日でCBR=10%
施工方法	生石灰(20mm)を散布し、 スタビライザーで攪拌混合後、 水砕スラグを散布し、 スタビライザーで攪拌混合、 速度3m/min

試験結果



参考文献

- 1) (財) 沿岸技術研究センター：港湾・空港における水砕スラグ利用マニュアル，2007.
- 2) (財) 沿岸技術研究センター：港湾工用水砕スラグ利用手引書，1989.
- 3) 日本工業規格：コンクリート用高炉スラグ微粉末 JIS A 6206 解説，解 5，1997.
- 4) 来山尚義：低置換率 SCP 工法における高炉水砕スラグの適用に関する研究，2003.5.
- 5) (財) 山口建設技術センター，山口県土木建築部，山口大学工学部：高炉水砕スラグの土木材料としての利用手引書，2004.3.
- 6) 鐵鋼スラグ協会西日本支部第 11 回技術交流会資料：締固め回数及び撒き出し厚さを変えた水砕スラグ盛土の固結特性について，2000.11.
- 7) 文献 1)
- 8) 文献 4)
- 9) 松田博，来山尚義，安藤義樹，中野恭夫：水砕スラグの地盤工学的有効利用に関する基礎的研究，地盤と建設，vol.16，No.1，pp33-40，1998.
- 10) 鐵鋼スラグ協会西日本支部第 9 回技術交流会資料：和歌山下津港土地造成事業埋立工事への水砕スラグ利用について，1998.
- 11) 文献 1)
- 12) 千葉県スラグ研究会：千葉県における路床用水砕スラグの検討，1999.6.
- 13) 文献 9)
- 14) 文献 5)
- 15) 文献 12)
- 16) 河野伊一郎，難波勲，二町宣洋：水砕スラグの工学的性質に関する研究，土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集，pp221-223，1982.
- 17) 文献 9)
- 18) 菊池喜昭，高橋邦夫：水砕スラグの力学特性の経年変化，港湾技研資料 No.915，1998.
- 19) 菊池喜昭，中島研司，木村淳治，水谷崇亮：港湾工事に用いる高炉水砕スラグの硬化特性，港湾空港技術研究所報告，第 45 巻 第 2 号，2006.
- 20) 富永真生，獅々田昭生，財木吉文，中里実三：軟弱地盤における水砕マット工法，第 12 回土質工学研究発表会発表講演集，III-318，pp1253-1256，1977.
- 21) 富永真生，獅々田昭生，財木吉文，中里実三：水砕マット工法 その 2，第 13 回土質工学研究発表会発表講演集，III-359，pp1433-1436，1978.
- 22) 文献 5)
- 23) 文献 9)
- 24) 河野伊一郎，遠藤隆，二町宣洋，昆野功：水砕スラグ地盤の土圧実験，第 40 回昭和 63 年度土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集，pp296-297，1988.
- 25) 文献 2)
- 26) 文献 1)
- 27) 文献 4)
- 28) 来山尚義，松田博，中野恭夫：SCP 工法における砂の代替材としての水砕スラグの強度・透水特性，第 34 回地盤工学研究発表会発表講演集，III-456，pp9-914，1999.
- 29) 文献 5)
- 30) 文献 6)
- 31) 国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所，(財) 沿岸開発技術研究センター：平成 14 年度 港湾構造物へのリサイクル材料（裏込・裏埋）活用開発調査報告書，2003.
- 32) 篠崎晴彦，松田博他：高炉水砕スラグの硬化が液状化特性に及ぼす影響，第 40 回地盤工学研究発表会 平成 17 年度発表講演集，No.294，D-07，pp587-588，2005.
- 33) (社) 日本道路協会：舗装設計施工指針，2001.12.

-
- 34) 運輸省第三港湾建設局 神戸港湾震災復興事務所, (財)沿岸技術研究センター: 神戸港 直轄災害復旧事業 施工技術開発調査(その2) 報告書(その4-軽量地盤材料による岸壁の復旧- ~水砕スラグ~), 1997.
 - 35) 文献 5)
 - 36) 文献 5)
 - 37) 河野伊一郎, 荻原明, 富永真生, 二町宣洋, 渡辺茂身: 土木工事における水砕スラグの用途, 川鉄技報, vol.12, No.2, 1980.
 - 38) 二町宣洋, 河野伊一郎, 飽浦靖, 渡辺茂身: 水砕スラグの水和硬化性状と工事適用例, 第14回土質工学研究発表会発表講演集, III-183, pp729-732, 1979.
 - 39) 鐵鋼スラグ協会: 土木用水砕スラグ, 1997.
 - 40) 文献 5)
 - 41) 文献 1)
 - 42) 篠崎晴彦, 松田博, 宮本孝行: 高炉水砕スラグ及び水砕スラグ・山砂混合材のサンドドレーン材の経年変化, 土木学会第57回年次学術講演会講演概要集, III-039, pp77-78, 2002.
 - 43) 鐵鋼スラグ協会: 鐵鋼スラグ製品の管理に関するガイドライン, 2006.
 - 44) 木次恭一: 軟弱地盤改良技術と環境問題, セメントコンクリート, No.511, pp104-115, 1989.
 - 45) 建設大臣官房技術調査室, 建設省建設経済局事業総括調整官室, 建設省建設経済局建設業課 監修, (財)先端建設技術センター 編著: 建設汚泥リサイクル指針, 1999.
 - 46) 日本化学会編 久保, 荒井共著: 産業化学シリーズ「新版化学肥料」, 大日本図書, 1977.
 - 47) 三吉, 生明, 鈴木, 荒井, 沼田: 高炉水砕スラグと鋼材腐食との関係について, 製鐵研究第301号, 新日本製鐵(株), 1980.
 - 48) 文献 1)
 - 49) 若狭幸隆, 杉本育雄, 小川憲保: 土木技術, vol.37, No.9, pp17-18, 67-74, 1982.9.

付 録

1. 本技術資料で使用する主な用語および単位

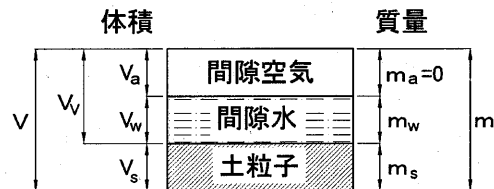
1.1. 用語

本技術資料で使用している主な用語の定義を付表 1.1.1 に示す。

付表 1.1.1 本技術資料で使用する主な用語の定義

用語	記号	単位	定義
土粒子密度	ρ_s	g/cm^3	土(水砕スラグ)粒子自身の質量をその土(水砕スラグ)粒子自身の体積で除したもので、「土粒子の密度試験方法」(JIS A 1202)によって測定することができる。
間隙比	e	—	土(水砕スラグ)の間隙の占める割合を示したもので、 $e=V_v/V_s$ (付図 1.1.1 参照) で表される。土粒子密度 ρ_s および乾燥密度 ρ_d をもとに、 $e=\rho_s/\rho_d-1$ より求めることができる。
含水比	w	%	土(水砕スラグ)中に含まれる水の割合を質量百分率で示したもので、 $w=m_w/m_s \times 100$ (付図 1.1.1 参照) で表される。乾燥密度 ρ_d および湿潤密度 ρ_t をもとに、 $w=(\rho_t/\rho_d-1) \times 100$ より求めることができる。
乾燥密度	ρ_d	g/cm^3	間隙水を含まない状態での土(水砕スラグ)の質量をその体積で除した値で、 $\rho_d=m_s/V$ (付図 1.1.1 参照) で表される。現場での乾燥密度は、「砂置換法による土の密度試験方法」(JIS A 1214)などによって測定することができる。
湿潤密度	ρ_t	g/cm^3	間隙水を含んだ状態での土(水砕スラグ)の質量をその体積で除した値で、 $\rho_t=(m_s+m_w)/V$ (付図 1.1.1 参照) で表される。現場での湿潤密度は、「砂置換法による土の密度試験方法」(JIS A 1214)などによって測定することができる。
飽和密度	ρ_{sat}	g/cm^3	間隙が水で飽和した状態での土(水砕スラグ)の質量をその体積で除したもので、土粒子密度 ρ_s および間隙比 e を用いて $\rho_{\text{sat}}=(\rho_s/\rho_w+e)/(1+e) \cdot \rho_w$ より求めることができる。(ρ_w : 水の密度)
乾燥単位体積重量	γ_d	kN/m^3	乾燥密度に重力加速度を乗じたもの。
湿潤単位体積重量	γ_t	kN/m^3	湿潤密度に重力加速度を乗じたもの。
飽和単位体積重量	γ_{sat}	kN/m^3	飽和密度に重力加速度を乗じたもの。
単位容積質量	T	kg/l	「骨材の単位容積質量及び実積率試験方法」(JIS A 1104) によって測定した単位容積当りの材料(水砕スラグ)の質量。
最大乾燥密度	ρ_{dmax}	g/cm^3	「突固めによる土の締固め試験方法」(JIS A 1210) によって測定した乾燥密度-含水比曲線における乾燥密度の最大値。
最適含水比	—	%	最大乾燥密度における含水比。
締固め度	—	%	締固め時に現場で測定した乾燥密度を最大乾燥密度で除した値を百分率で示したもの
拘束圧依存性	—	—	三軸圧縮試験において、拘束圧に応じて原点から引いたせん断抵抗角 ϕ_0 が変化する性質。

一軸圧縮強さ	q_u	kN/m^2	「土の一軸圧縮試験方法」(JIS A 1216) によって求めた圧縮強さ。
撒き出し厚	—	cm (m)	盛土材などを撒き出す時の1層あたりの厚さ。例えば、厚さ90cmの路床を30cmずつ3層で撒き出す場合の撒き出し厚は30cmとなる。
敷き均し	—	—	撒き出した材料を、ブルドーザなどによって厚さ(高さ)が均一になるように整えること。
凍上	—	—	土が凍結する過程で、スラグ中に発生した氷晶の成長により、上方に向かって膨張すること
コラップス沈下	—	—	浸水により土の構造が破壊され、沈下すること



付図 1.1.1 水砕スラグの物理量の考え方

1.2. 単位

本技術資料で使用している主な単位について、各単位間の換算を付表 1.2.1 に示す。

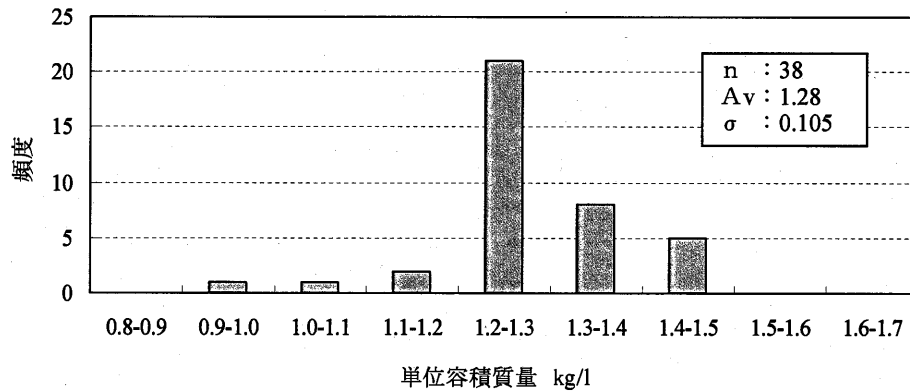
付表 1.2.1 各単位間の換算

量	単位	各単位間の換算	
単位体積重量	kN/m^3	1tf/m^3	$=9.81\text{kN/m}^3$
密度	g/cm^3	1kg/l	$=1\text{g/cm}^3$
		1t/m^3	$=1\text{g/cm}^3$
圧力, 変形係数	kN/m^2 MN/m^2 kPa	1tf/m^2	$=9.81\text{kN/m}^2$
		1kgf/cm^2	$=0.0981\text{MN/m}^2$
		1kgf/cm^2	$=98.1\text{kPa}$
		1kN/m^2	$=1\text{kPa}$

2. 水砕スラグの単位容積質量，密度，単位体積重量

2.1. 全国の水砕スラグの単位容積質量

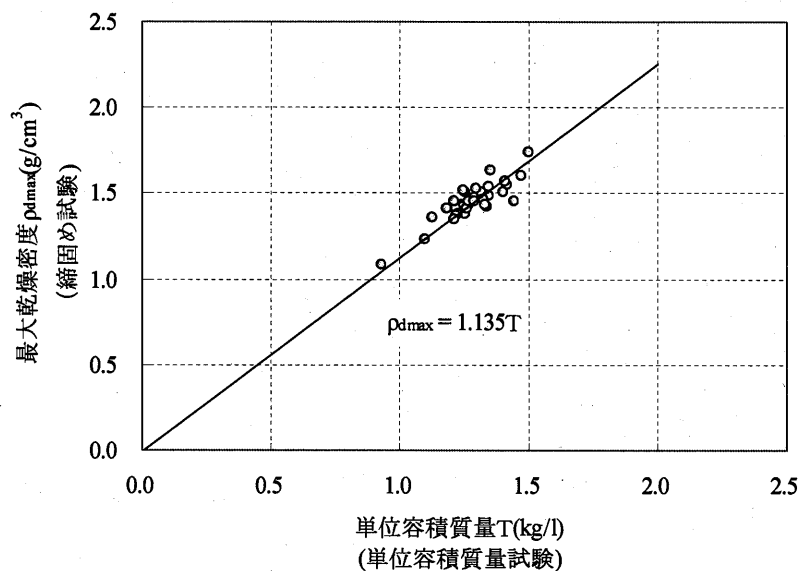
製鉄所内では，一般に単位容積質量試験（JIS A 1104「骨材の単位容積質量及び実積率試験方法」による）による品質管理が定期的に行われている．付図 2.1.1 は，全国の 13 製鉄所で製造された水砕スラグについて行った単位容積質量試験結果をヒストグラムに示したものであるが，単位容積質量の平均値は 1.28kg/l であった．



付図 2.1.1 水砕スラグの単位容積質量

2.2. 単位容積質量試験結果からの最大乾燥密度の推定

製鉄所内で一般に行われている単位容積質量試験結果から最大乾燥密度を推定するのであれば，付図 2.2.1 を参考にすることができる．最大乾燥密度は単位容積質量の 1.1 倍程度である．



付図 2.2.1 最大乾燥密度（縮固め試験）と単位容積質量（単位容積質量試験）との関係

2.3. 各室内試験による乾燥密度の比較

付表 2.3.1 は、全国の製鉄所で製造された水砕スラグの室内試験結果から求めた水砕スラグの乾燥密度の平均値である。単位容積質量試験から得られた乾燥密度は、他の試験結果から求めた値より小さい値となった。このように、水砕スラグの締固め方法として、棒突き法は他の締固め方法よりも締固めにくい傾向がある。

付表 2.3.1 試験毎の水砕スラグの乾燥密度平均値（室内試験）

試験方法	項目	平均値 (g/cm ³)	備考
砂の最小密度・最大密度試験 (JIS A 1224)	最大密度	1.43	モールドへの打撃による締固め
骨材の単位容積質量及び実積率試験 (JIS A 1104)	単位容積質量	1.28	棒突きによる締固め, kg/lを換算
突固めによる土の締固め試験 (JIS A 1210)	最大乾燥密度	1.45	ランマーによる突固め

2.4. 締固め試験結果からの現場での単位体積重量の推定

(1) 単位体積重量の推定式

現場での締固め度(%) (現場乾燥密度 ρ_d /締固め試験による最大乾燥密度 ρ_{dmax}) を仮定すれば、締固め試験結果をもとに、現場での乾燥単位体積重量の概略値を推定することができる。いま、現場での乾燥単位体積重量を γ_d (kN/m³)、最大乾燥密度を ρ_{dmax} (g/cm³)、重力加速度を 9.81(m/s²)とすると、現場での乾燥単位体積重量の概略値は次式で推定できる。

$$\gamma_d = (\rho_{dmax} \times \text{締固め度}/100) \times 9.81$$

また、含水比を w (%)と仮定すると、現場での湿潤単位体積重量 γ_t (kN/m³)の概略値は次式で推定できる。

$$\gamma_t = (\rho_{dmax} \times \text{締固め度}/100) \times (100 + w)/100 \times 9.81$$

(2) 単位体積重量の推定例

「3.1.2 単位体積重量」の項で、設計に用いる単位体積重量を設定した。この際の計算過程を、単位体積重量の推定例として以下に示す。

- ・最大乾燥密度 ρ_{dmax}

全国の 13 製鉄所で製造された水砕スラグの締固め試験による最大乾燥密度の平均値より、 $\rho_{dmax} = 1.45 \text{g/cm}^3$ とした。

- ・締固め度(ρ_d / ρ_{dmax})

盛土などの締固め作業では，締固め度が 90%以上となるように施工管理されることが多いことから，締固め度=90%とした。

・含水比

水砕スラグの平均的な自然含水比として， $w=10\%$ とした。

$$\begin{aligned}\text{乾燥単位体積重量推定値 } \gamma_d &= (\rho_{d\max} \times \text{締固め度} / 100) \times 9.81 \\ &= (1.45 \times 90 / 100) \times 9.81 \\ &= 12.80 \text{ kN/m}^3\end{aligned}$$

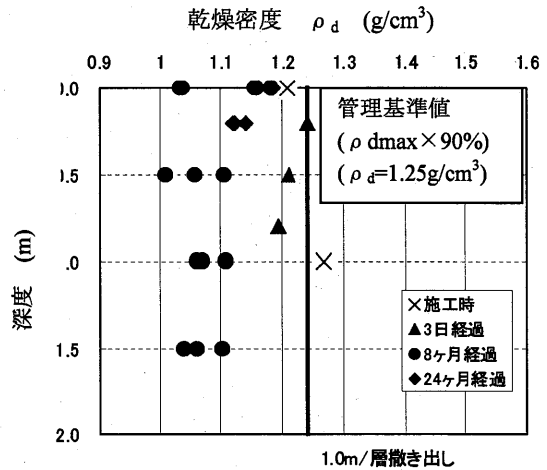
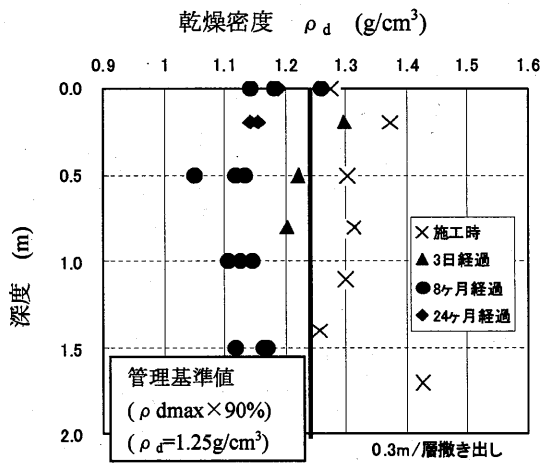
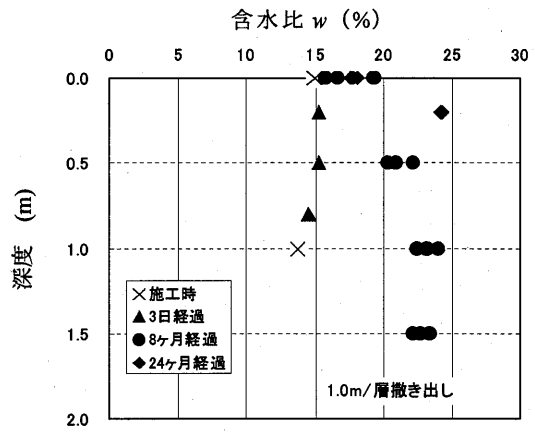
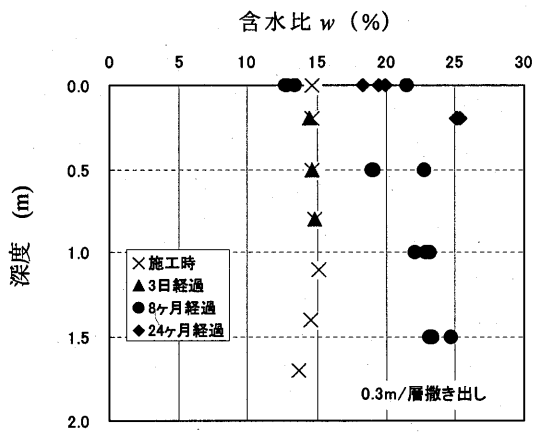
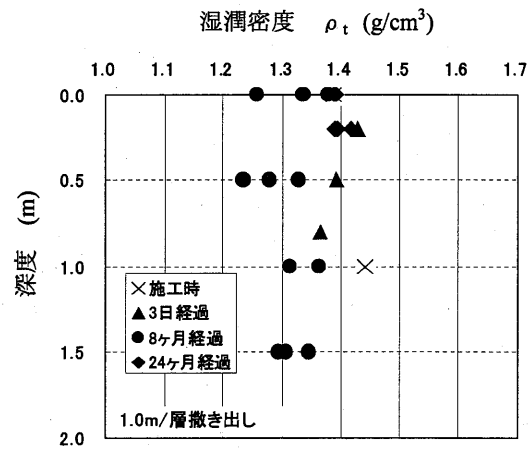
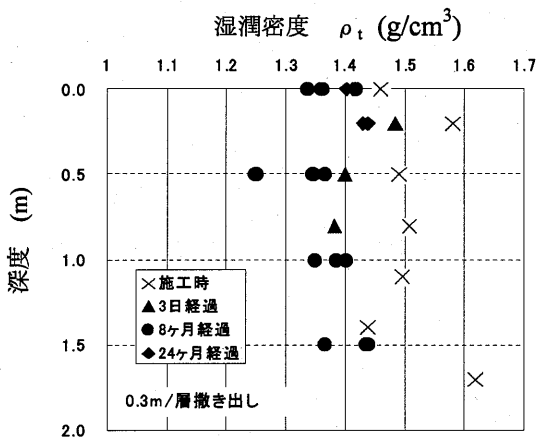
$$\begin{aligned}\text{湿潤単位体積重量推定値 } \gamma_t &= (\rho_{d\max} \times \text{締固め度} / 100) \times (100 + w) / 100 \times 9.81 \\ &= (1.45 \times 90 / 100) \times (100 + 10) / 100 \times 9.81 \\ &= 14.08 \text{ kN/m}^3\end{aligned}$$

2.5. 既往の事例における現場密度

既往の調査事例では，湿潤単位体積重量は $12 \text{ kN/m}^3 \sim 16 \text{ kN/m}^3$ （湿潤密度： $1.2 \text{ g/cm}^3 \sim 1.6 \text{ g/cm}^3$ ），乾燥単位体積重量は $10 \text{ kN/m}^3 \sim 14 \text{ kN/m}^3$ （乾燥密度： $1.0 \text{ g/cm}^3 \sim 1.4 \text{ g/cm}^3$ ）という範囲であった。以下に盛土および覆土の調査事例を示す。

○事例 1：盛土の試験施工

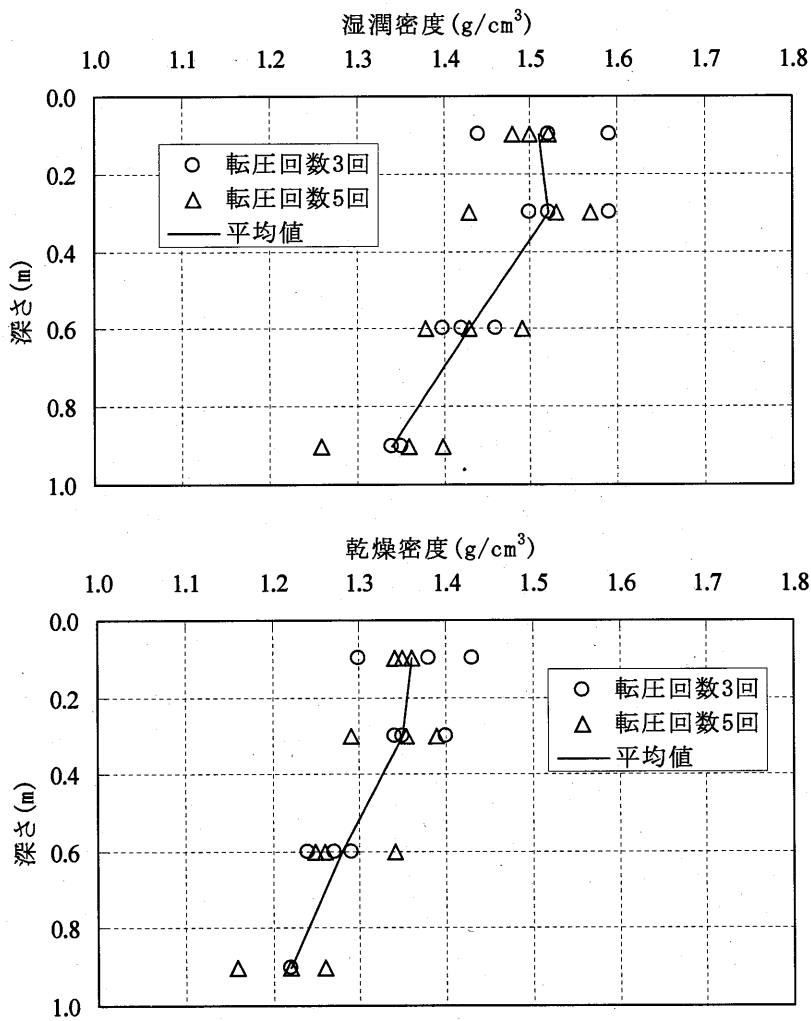
付図 2.5.1 は，在来地盤に水砕スラグ（土粒子密度 $\rho_s = 2.766 \text{ g/cm}^3$ ，最大間隙比 $e_{\max} = 1.445$ ，最小間隙比 $e_{\min} = 0.893$ ）を 2m の厚さで試験盛土を行った時の，砂置換法による現場密試験結果である。盛土の撒き出しは 0.3m 厚および 1.0m 厚の 2 ケースで行っている。また，乾燥密度 ρ_d の管理基準値を，締固め試験（JIS A1210 第 1 法）で得られた最大乾燥密度（ $\rho_{d\max} = 1.39 \text{ g/cm}^3$ ）の 90%（ $\rho_d = 1.25 \text{ g/cm}^3$ ）として締固めている（3.5t 湿地ブルドーザを使用）ため，施工時の乾燥密度はすべて 1.25 g/cm^3 以上（1 層撒き出し域の一部のデータを除く）となっている。湿潤密度は，ばらつきはあるものの概ね $1.25 \sim 1.45 \text{ g/cm}^3$ 程度（施工時は除く）であり，施工後 2 年経過しても大きな変化は見られなかった。また，含水比は経時的に増加している。



付図 2.5.1 水砕スラグ試験盛土の密度および含水比¹⁾

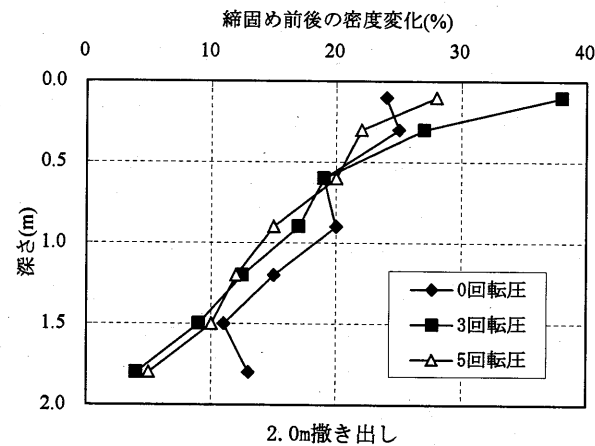
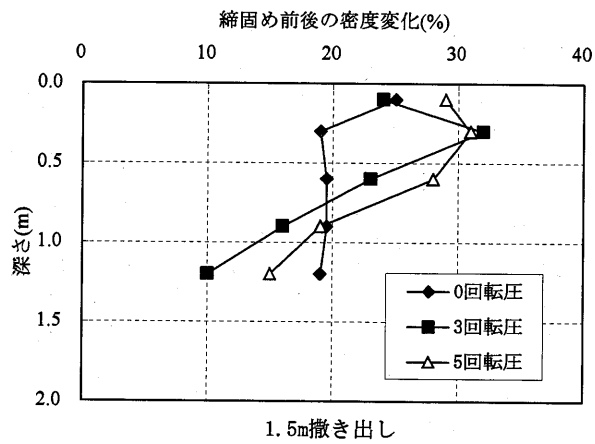
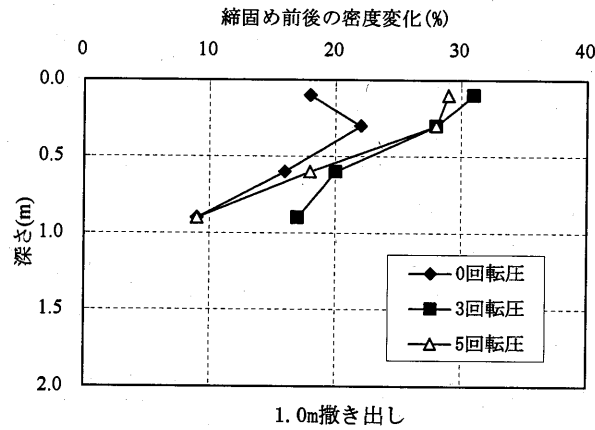
○事例2：覆土の試験施工

付図 2.5.2 は、埋立地の覆土に用いた水砕スラグの湿潤密度および乾燥密度を示したものである。撒き出し厚は 1.0m, 1.5m, 2.0m の 3 種類であり，転圧(16t 湿地ブルドーザ；接地圧 30kN/m²) 回数は 3 回および 5 回(敷き均し時のブルドーザによる転圧は除く)である。通常の施工では撒き出し厚は 1.0m 以下で行われることが多いため，深さ 1.0m 以下の密度のみを抽出している。いずれのケースも表層から 30cm までは締固め効果が見られほぼ同じ密度を示すが，それ以深では深さに伴い密度が低下する傾向にある。また，湿潤密度は $\rho_t = 1.2\text{g/cm}^3 \sim 1.6\text{g/cm}^3$ ，乾燥密度は $\rho_d = 1.1\text{g/cm}^3 \sim 1.4\text{g/cm}^3$ であり，転圧回数による違いは見られない。



付図 2.5.2 覆土に用いた水砕スラグの密度²⁾に加筆

付図 2.5.3 は、締固め前後の密度変化の深さ方向の分布を示したものであり、撒き出し厚 1.0m, 1.5m, 2.0m の場合について整理している。撒き出し厚が 1.5m 以下の場合には、密度変化は概ね 10%~30%程度であるが、撒き出し厚が 2.0m になると、最低値が 5%程度となっている。



付図 2.5.3 締固め前後の密度変化の深度分布 ²⁾に加筆

-
- 1) (財) 山口建設技術センター, 山口県土木建築部, 山口大学工学部: 高炉水砕スラグの土木材料としての利用手引書, 2004.3.
 - 2) 鐵鋼スラグ協会西日本支部第 11 回技術交流会資料: 締固め回数及び撒き出し厚さを変えた水砕スラグ盛土の固結特性について, 2000.11.

高炉水砕スラグ「土工用材料としての技術資料」作成メンバー

監修 松田 博 山口大学 大学院 教授

鐵鋼スラグ協会 技術委員会 土工WGメンバー

光藤浩之	J F E ミネラル(株)製鉄関連事業部技術サービス部主任部員
(吉澤千秋)	J F E ミネラル(株)製鉄関連事業部技術サービス部長
上原彰夫	協材砕石(株)取締役技術部長
蔵本和人	神鋼スラグ製品(株)技術部課長
(山田 紘)	神鋼スラグ製品(株)技術部課長
東 和彦	新日本製鐵(株)技術総括部スラグ・セメント事業推進部マネージャー
高橋克則	J F E スチール(株)スチール研究所スラグ・耐火物研究部主任研究員
和田 隆	J F E ミネラル(株)京浜製造所製造部長
島崎信明	住金鉱化(株)和歌山事業所専任部長
泉水憲夫	(株)テツゲン研究開発部担当課長
宮中勇治	日新製鋼(株)呉製鉄所環境防災部スラグ販売・開発チームリーダー

関係者 竹田正彦 パシフィックコンサルタンツ(株)港湾部港湾構造グループ主任

事務局

内田靖人	鐵鋼スラグ協会常務理事
奥村博昭	鐵鋼スラグ協会技術部長

* (カッコ) 内は、前任者を示す